

629.9 (494

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE

PROJET D'ÉCOLE

ÉNERGIE

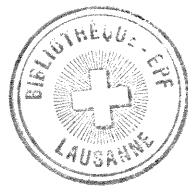
RAPPORT FINAL

PROFESSEURS L. BOREL
J. J. MORF
G. SARLOS
P. SUTER

Al 770 4e ex.

620.92 : 523.9-7

620.92.001.57



268 194

Cat. 6.86

TABLE DES MATIERES

	<u>PAGES</u>
A. <u>INTRODUCTION</u>	8
B. <u>CONSOMMATION</u>	13
1. OBJECTIFS ET MOYENS MIS EN OEUVRE	13
2. SAISIE DES DONNEES	13
2.1. Données souhaitables	14
2.1.1. Energies et agents énergétiques	14
2.1.2. Type d'utilisation - Définition de la nature des demandes	15
2.1.3. Secteurs d'utilisation	16
2.1.4. Stockage	16
2.1.5. Secteur Production - Transport - Transformation - Distribution PTTD	18
2.2. Données disponibles	18
2.3. Données possibles	19
2.4. Structure du système de saisie des données à envisager	21
2.5. Méthodes d'évaluation des données inaccessibles directement	22
2.5.1. Hypothèses	22
2.5.2. Similitudes	23
2.5.3. Déduction	23
3. EVOLUTION DE LA CONSOMMATION GLOBALE D'ENERGIE PRIMAIRE DE 1950 A NOS JOURS	24
3.1. Consommations globales	24
3.1.1. Consommation d'énergie au niveau des derniers consommateurs	25
3.2. Pétrole	25
3.2.1. Consommation d'énergie sans les produits pétroliers	25
3.2.2. Bâtiment	25
3.2.3. Transport	26
3.2.4. Industrie	27

3.3. Gaz	27
3.4. Charbon	27
3.5. Bois	27
3.6. Electricité	28
4. BILAN ENERGETIQUE	28
4.1. Méthode adoptée	28
4.2. Choix de l'année de référence	29
4.3. Bilan 1974	30
4.3.1. Répartition des demandes utiles par usage	30
4.3.2. Répartition des demandes utiles par agent énergétique	30
4.3.3. Degré d'autarcie pour la satisfaction de nos demandes d'énergie	32
4.3.4. Degré d'autarcie dans l'approvisionnement national en énergie	32
4.3.5. Efficacité moyenne d'utilisation finale de l'énergie à partir des sources primaires	34
5. MATRICE DES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES	34
5.1. La matrice de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE)	35
5.2. Avantages et inconvénients de la matrice	35
5.2.1. Avantages	35
5.2.2. Inconvénients	37
6. BILAN EXERGETIQUE	37
6.1. Méthode	38
6.1.1. Définition de l'exergie dans le cas d'un transfert - chaleur	38
6.1.2. Détermination des températures de référence T_a	40
6.1.3. Choix des températures de transfert T	41
6.1.4. Efficacités énergétiques	41
6.2. Ventilation des usages thermiques	43
6.2.1. Chauffage des locaux	43

6.2.2. Eau chaude sanitaire	43
6.2.3. Cuisson	44
6.2.4. Procédés industriels	44
6.3. Comptabilité exergétique	44
6.3.1. Chauffage des locaux	44
6.3.2. Eau chaude sanitaire	45
6.3.3. Cuisson	45
6.3.4. Procédés industriels	45
6.3.5. Consommations exergétiques pour les usages autres que thermiques	46
6.4. Bilan exergétique	46
7. RAPPORTS ANNEXES ET PUBLICATIONS	49
8. REFERENCES	49
C. <u>ENVIRONNEMENT</u>	51
1. OBJECTIFS ET MOYENS MIS EN OEUVRE	51
2. RECHERCHES	52
2.1. Perspectives générales	52
2.2. Etudes d'effets	56
2.2.1. Emissions chimiques ou physiques dans l'air et dans l'eau	57
2.2.2. Emissions affectant le paysage	59
2.2.3. Emissions de bruit des sources mobiles	60
2.2.4. Epuisement des ressources énergétiques	62
2.2.5. Risques d'accidents	64
2.3. Méthodes d'évaluation	66
2.3.1. Fonction de dégradation	66
2.3.2. La méthode AMIEE	68
2.4. Etudes annexes	77
2.4.1. Coûts de diminution	77
2.4.2. Normes de protection de l'environnement	77

3. INTERACTION AVEC LE VOLET MODELISATION	79
3.1. Contributions à la banque de données CARTEN	79
3.2. Analyse de scénarios énergétiques	79
4. TEST D'APPLICATION	80
4.1. But et signification du test	80
4.2. Scénario	80
4.3. Matrice des effets	81
4.4. Index d'épuisement des ressources énergétiques et index de risques d'accidents	82
4.5. Evaluation finale	82
5. RAPPORTS ANNEXES ET PUBLICATIONS	86
 D. <u>ÉNERGIE SOLAIRE</u>	 89
1. OBJECTIFS ET MOYENS MIS EN OEUVRE	89
2. RECHERCHES SECTORIELLES	91
2.1. Captage en façade	91
2.1.1. Introduction	91
2.1.2. Etudes réalisées	92
2.1.3. Conclusions	99
2.2. Systèmes actifs de préparation d'eau chaude : Interaction entre paramètres météorologiques et paramètres du système	99
2.2.1. Pose du problème	99
2.2.2. Etapes de travail	100
2.2.3. Résultats	102
2.2.4. Conclusions	107
2.3. Systèmes combinées solaire + pompe à chaleur	107
2.3.1. But de la recherche	107
2.3.2. Installation expérimentale	108
2.3.3. Comportement de composantes	112
2.3.4. Performance de la thermopompe dans l'ins- tallation combinée d'Epalinges	115

2.4. Machines thermiques solaires à absorption directe du rayonnement	120
2.4.1. Idée de base	120
2.4.2. Le comportement de suspensions	123
2.4.3. Jugement sur la méthode de l'absorption directe du rayonnement solaire	127
2.4.4. Conclusions	129
2.5. Stockage de l'énergie thermique par chaleur latente de fusion	130
2.5.1. But	130
2.5.2. Actions	130
2.5.3. Résultats	132
2.6. Evaluation socio-économique de l'énergie solaire pour le chauffage de l'eau chaude	137
2.6.1. Objectifs	137
2.6.2. Méthodes de recherche	137
2.6.3. Résultats	138
2.6.4. Conclusions	144
3. TECHNOLOGIES SOLAIRES POUR L'AMENAGEMENT ENERGETIQUE DES BATIMENTS EN SUISSE	146
4. RETOMBEES DE L'ACTIVITE DU VOLET SOLAIRE	147
4.1. Retombées indirectes	147
4.2. Applications pratiques	149
5. ROLE DE L'ENERGIE SOLAIRE EN SUISSE	149
5.1. Potentiel de remplacement	150
5.1.1. Aspects techniques	150
5.1.2. Aspects de rentabilité	151
5.1.3. Mesures d'encouragement	153
5.2. Potentiel "antichômage"	154
5.2.1. Economie intérieure	154
5.2.2. Produits d'exportation	154
6. RAPPORTS ANNEXES ET PUBLICATIONS	155

E. <u>MODELISATION</u>	161
1. OBJECTIFS ET MOYENS MIS EN OEUVRE	161
1.1. But de la modélisation	161
1.2. Description du système énergétique étudié	161
1.3. Choix du modèle	162
1.3.1. Objectifs du modèle de production	162
1.3.2. Description du modèle	164
1.3.3. Données du modèle	165
1.3.4. Résultats du modèle	165
1.3.5. Limites et extensions possibles du modèle	166
2. BANQUE DE DONNEES CARTEN	167
2.1. But ; sources de données	167
2.2. Description des principales caractéristiques	168
2.3. Etat actuel de la banque de données - Restrictions	173
3. DESCRIPTION DU MODELE RETINE	174
3.1. Réseau énergétique	174
3.2. Description du modèle mathématique	179
3.3. Fonction objectif	183
3.4. Attractivité, sévérité	184
3.5. Exemple illustratif	186
4. CONTENU ENERGETIQUE PAR UNITE MONETAIRE DE DEMANDE FINALE DES BIENS ET SERVICES EN SUISSE (1970) ET RENDEMENT NET DES TECHNOLOGIES	188
4.1. Energie et investissement	188
4.2. Contenu énergétique par unité monétaire de demande finale des biens et services	190
4.3. Le contenu énergétique des biens et services, en Suisse (1970)	194
4.4. Temps de remboursement énergétique des technologies	198

5. EXEMPLES D'APPLICATION	199
5.1. Limites du système énergétique étudié	199
5.2. Rappel des limites du modèle	200
5.3. Demande annuelle d'énergie utile, scénarios choisis	202
5.3.1. Demande d'énergie utile	202
5.3.2. Scénarios choisis	204
5.4. Application du modèle et analyse des résultats	204
5.4.1. Comparaison des puissances selon le critère d'affectation	206
5.4.2. Comparaison des puissances résultant des deux scénarios de la demande (IIIc et stabilisation)	212
5.4.3. Examen de l'évolution des puissances, coûts d'exploitation annuels et investissements avec la sévérité de l'affectation	214
5.4.4. Exemple d'étude de sensibilité	219
5.4.5. Effet de contraintes	220
5.5. Interactions énergie - environnement	225
5.5.1. Profils de caractéristiques	225
5.5.2. Attractivité tenant compte des effets sur l'environnement	225
6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	230
7. RAPPORTS ANNEXES ET PUBLICATIONS	232
8. REFERENCES	232
F. <u>CONCLUSIONS</u>	235

A. INTRODUCTION

L'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPF-L) a décidé, il y a quelques années, de mettre en place une nouvelle structure de recherche appelée Projet d'Ecole.

Un Projet d'Ecole est un axe préférentiel de recherche, choisi par l'EPF-L, suite à un consensus général et bénéficiant de mesures d'encouragement particulières. Il présente notamment les caractéristiques suivantes :

- . concentration des efforts sur un nombre limité de thèmes présentant un intérêt général manifeste pour la collectivité ; cette concentration polarise les efforts d'un certain nombre de chercheurs et crée un rassemblement des forces dont l'importance est suffisante pour que l'Ecole devienne un partenaire de valeur dans la communauté scientifique et technique internationale
- . orientation de la recherche de l'Ecole vers des études susceptibles de produire le maximum de résultats pour la collectivité, en rapport avec les investissements consentis
- . concentration interdisciplinaire et interdépartementale, et création des conditions favorables à l'innovation, à la collaboration et aux transferts de connaissances ou de savoir-faire
- . gestion et financement autonomes dans le cadre de l'EPF-L
- . durée normalement limitée à quatre ans.

Le Projet d'Ecole ENERGIE est issu de la prise de conscience de la gravité du problème de l'énergie, la menace essentielle étant l'épuisement des ressources énergétiques à une échéance qu'il faut qualifier de proche.

Pour La Suisse, le problème d'approvisionnement en énergie primaire se complique du fait de notre dépendance de l'étranger dans une proportion extrêmement élevée, qui se situe autour de 80%, de sorte que certains événements ou décisions politiques sont susceptibles de perturber gravement notre bilan énergétique.

Parallèlement à ces aspects, les préoccupations écologiques exigent la recherche des chaînes énergétiques les plus adéquates à l'égard de la protection de l'environnement.

Enfin, les nécessités de rentabilité, dans le sens le plus large du terme, nécessitent l'examen de l'ensemble du problème, d'une part, sous l'angle technique et, d'autre part, sous l'angle économique.

Il convient de faire face à cette situation par un certain nombre de dispositions, de mesures et d'aménagements, notamment :

- . la lutte contre le gaspillage d'énergie, susceptible de diminuer les demandes de consommation
- . l'utilisation de chaînes énergétiques faisant appel à des sources d'énergie primaire renouvelable (soleil, hydraulité, bois, etc) permettant de prolonger la disponibilité des sources d'énergie non renouvelable
- . la diversification de l'utilisation des énergies primaires, capable de réduire les difficultés d'approvisionnement
- . la mise en place de techniques compatibles avec la qualité de l'environnement.

L'objectif du Projet d'Ecole ENERGIE est d'apporter une contribution à la résolution des problèmes ci-dessus, notamment à l'aide des démarches suivantes :

- . établissement des matrices énergétique et exergétique relatives aux consommations énergétiques de la Suisse
- . quantification des effets du système énergétique suisse sur l'environnement et création d'une méthode permettant de prendre en considération ces effets dans l'analyse et la modification de scénarios énergétiques
- . recherche technique centrée sur l'énergie solaire et évaluation des chances de l'utilisation de celle-ci dans le bâtiment, en Suisse
- . élaboration de chaînes énergétiques mieux adaptées sur les plans techniques et économiques (couplage électricité-chaleur, répartition des moyens de production d'énergie dans le territoire, taille des installations, réseaux de distribution d'énergie, transport, stockages, ...) et évaluation de celles-ci par la synthèse des implications des diverses stratégies.

Dans ce qui suit, le Projet d'Ecole ENERGIE sera mentionné sous la forme raccourcie P.E. ENERGIE.

La gestion du P.E. ENERGIE a été assurée par une direction dont la composition était la suivante :

Président :

- . Professeur L. Borel, Institut de Thermodynamique
Responsable du volet ENVIRONNEMENT

Membres :

- . Professeur J.-J. Morf, Laboratoire de réseaux d'énergie électrique
Responsable du volet CONSOMMATION

- . Professeur P. Suter, Institut de thermique appliquée
Responsable du volet ENERGIE SOLAIRE
- . Professeur G. Sarlos, Institut d'économie et aménagements énergétiques
Responsable du volet MODELISATION.

La direction du P.E. ENERGIE a été assistée pour la coordination scientifique par M. J.R. Muller et pour les tâches administratives par M. P.A. Berthoud, ces deux collaborateurs ayant participé d'ailleurs aux travaux de recherche du P.E..

La coordination scientifique a été exécutée au sein d'un groupe de travail dont la composition était la suivante :

Responsable :

- . J.R. Muller

Membres :

- . P.A. Berthoud, volet CONSOMMATION
- . M.A. Erbetta, volet ENVIRONNEMENT
- . A.G. Garnier, volet ENERGIE SOLAIRE
- . B. Saugy, volet MODELISATION.

Le P.E. ENERGIE a un caractère multidisciplinaire. Il a occupé, à des titres divers, à temps complet ou à temps partiel, 9 professeurs et 30 collaborateurs scientifiques répartis dans 9 instituts, chaires ou laboratoires, selon la liste suivante :

- . Laboratoire de réseaux d'énergie électrique (Département d'électricité)

Professeur J.J. Morf

P.A. Berthoud

O. Bovay

J.Ch. Cardinaux

- . Institut d'économie et aménagements énergétiques (Département du génie civil)

Professeur G. Sarlos

Professeur A. Gardel

Y. Bovet +

Ph. Dind

D. Grin

A. Roulier

B. Saugy

J.M. Toinet

F. Vuille

- . Institut du génie de l'environnement (Département du génie rural et géomètres)

Professeur Y. Maystre

. Institut de thermodynamique (Département de mécanique)

Professeur L. Borel

M.A. Erbetta

A. Gogniat

L. Krayenbühl

P. Matthey

D. Przybecka

B.L. Reymond

M. Rollier

. Laboratoire de physique théorique (Département de physique)

Professeur A. Faist

Dr. J.B. Gay

A. Razafindraibe

. Chaire de construction (Département d'architecture)

Professeur G. van Bogaert

F. Thévenon

. Institut de thermique appliquée (Département de mécanique)

Professeur P. Suter

M. Abdelrahman

G. Clerc

P. Fumeaux

Ch. Marquis

J.R. Muller

. Institut de génie chimique (Département de chimie)

Professeur P. Javet

L. Keller

R. Noppel

. Institut de recherche sur l'environnement construit

Professeur J. Csillaghy

P. Briner

A. Garnier

J.P. Marguerat

. Un certain nombre d'étudiants du 3ème cycle, de diplômants et d'assistants-étudiants.

Le financement du P.E. ENERGIE a été réalisé à l'aide des sources suivantes :

. crédits ordinaires et extraordinaires des instituts, chaires et laboratoires participant au P.E. ENERGIE

. crédit spécial accordé au P.E. ENERGIE dans le cadre de l'EPF-L

Fr. 2'370'000.-

. différentes Institutions, Fonds et Commissions à l'échelle nationale

Fr. 2'020'000.- .

Le P.E. ENERGIE a donné lieu à de nombreuses relations extérieures, notamment :

- . cours de formation dans plusieurs villes
- . mandats d'étude à l'échelle des cantons
- . relations avec l'Institut fédéral de recherches en matière de réacteurs (IFR), l'Institut suisse de météorologie (ISM) et l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN)
- . participation aux travaux de la Commission nationale pour l'utilisation de l'énergie solaire (KNS) et de la Commission fédérale de la conception globale de l'énergie (GEK)
- . participation officielle aux travaux de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE).

Le but du P.E. ENERGIE est de créer, sur des bases scientifiques, des modèles permettant de saisir le comportement de l'ensemble du système énergétique suisse. Les modèles établis doivent constituer des outils de travail destinés à être mis au service des responsables de l'économie énergétique du pays.

Il faut reconnaître que le problème fondamental posé par l'énergie exige aujourd'hui une approche beaucoup plus globale que celle avec laquelle il a été abordé par le passé. Cela est dû à la dimension exceptionnelle liée à l'étendue de ses implications dans l'espace et dans le temps. C'est pourquoi, la recherche faisant l'objet du P.E. ENERGIE est placée dans la perspective d'une conception globale de l'énergie. Elle comprend nécessairement, non seulement les aspects techniques et économiques, mais aussi les aspects liés à l'environnement qui, par certains côtés, touchent les aspects sociaux.

Les objectifs particuliers du P.E. ENERGIE sont répartis dans le corps du présent résumé. Ils sont présentés au début des textes relatifs à chacun des quatre volets CONSOMMATION, ENVIRONNEMENT, ENERGIE SOLAIRE et MODELISATION.

B. CONSOMMATION

1. OBJECTIFS ET MOYENS MIS EN OEUVRE

L'objectif du volet CONSOMMATION est d'effectuer les recherches suivantes :

- . Synthèse des documents existants sur les consommations énergétiques de la Suisse de 1950 à 1975
- . Etablissement d'une matrice des besoins énergétiques
- . Etablissement d'une matrice des besoins exergétiques
- . Recherche des données numériques pour compléter les matrices énergétiques et exergétiques.

Au départ de notre étude, nous disposions des statistiques énergétiques globales annuelles établies conjointement par l'Office fédéral de l'énergie, le Comité national de la Conférence mondiale de l'énergie et l'Union des centrales suisses d'électricité. Ces données par trop générales permettaient seulement de suivre l'évolution de la consommation d'énergie d'une année à l'autre. Malheureusement, ces renseignements ne permettent pas une analyse suffisante des raisons régissant cette évolution. Il a fallu avoir recours à des enquêtes dont la plupart ont été menées par la GEK ou ses mandataires auprès de certaines catégories de consommateurs et mis à notre disposition par l'Office fédéral de l'énergie, à des études ponctuelles réalisées par les producteurs et les distributeurs d'énergies ou dans le cadre même du P.E. ENERGIE, à des approches par déduction ou simplement à des estimations souvent un peu spéculatives lorsqu'il s'est agi de chiffrer des consommations d'énergie peu représentatives et sans incidence importante sur l'interprétation des résultats.

2. SAISIE DES DONNEES (Réf. 1, 2, 4, 5, 10, 11, 12, 14)

La saisie des données est d'une importance fondamentale. Elle conditionne la qualité de l'outil d'analyse des résultats obtenus et des conclusions qui en découleront.

Il faut que les informations nécessaires puissent être disponibles lorsqu'on en a besoin et suffisantes en qualité et en quantité. Plus on

voudra pousser l'analyse du système énergétique, plus le volume d'informations nécessaires augmentera. On sera obligé, à un moment donné, de fixer les limites de l'analyse qui dépendront d'un degré encore raisonnable de faisabilité de la saisie des données d'une part, et de l'intérêt pour la collectivité du niveau de précision des résultats d'autre part. La saisie des données est soumise à un certain nombre de contraintes restrictives : coût, difficulté, voire impossibilité techniques, incompatibilité entre le désir et la réalité en l'absence de mesures contraignantes vis-à-vis des consommateurs. Il faut être conscient que ce travail est considérable et que toutes les mesures propres à le simplifier (à commencer par la motivation du consommateur) doivent être encouragées.

2.1. Données souhaitables

De façon très générale, il convient de se demander quelle est la quantité et la nature de l'énergie consommée, dans quel but et par qui ? Les informations recueillies doivent permettre de répondre aussi bien aux nécessités de politique et d'économie nationales qu'aux demandes formulées par les organisations internationales auxquelles la Suisse participe.

Elles concernent les énergies et agents énergétiques suivants :

2.1.1. Energies et agents énergétiques

Les sources d'énergie (énergies primaires) sont :

- . Charbon (houille, anthracite, lignite, etc)
- . Pétrole (pétrole brut)
- . Gaz naturel
- . Bois, tourbe
- . Energie hydraulique
- . Energie nucléaire
- . Energie géothermique
- . Energie solaire
- . Energie éolienne
- . Environnement (source froide de pompes à chaleur, déchets, ordures, ...)

Les agents énergétiques (énergies intermédiaires) sont :

- . Coke
- . Gaz
- . Biogaz

- . Déchets et ordures
- . Electricité
- . Fluides caloporteurs (chauffage à distance)
- . Hydrogène

2.1.2. Types d'utilisation - Définition de la nature des demandes

Nous avons sciemment abandonné la notion de besoin, car qu'est-ce qu'un besoin ? Selon Larousse : "Sensation d'un manque ou d'un malaise, qui porte les êtres vivants à certains actes indispensables à l'entretien de la vie". Notre consommation énergétique a dépassé depuis longtemps le niveau du besoin et satisfait une notion de confort qui nous est agréable mais non indispensable à la vie. L'homme aspire à toujours plus de commodités entraînant inmanquablement une constante augmentation de sa demande en énergie. Même s'il en a les moyens financiers, pourra-t-il toujours poursuivre cette croissance énergétique à n'importe quel prix ? Nous retenons 4 grandes catégories d'utilisation d'énergie :

- . la lumière
- . les procédés chimiques
- . les usages mécaniques
- . les usages thermiques

En plus, les usages thermiques sont à subdiviser en fonction des niveaux de température requis :

- . usage frigorifique ($<0^{\circ}\text{C}$)
- . chauffage des locaux (20°C)
- . eau chaude sanitaire (50°C)
- . cuisson (150°C)
- . procédés industriels (500°C)

Ces demandes en énergie utile peuvent être satisfaites par différents procédés :

- . consommation directe d'un agent énergétique
- . utilisation de l'énergie en cascade (par récupération de chaleur p.ex.)
- . production combinée d'énergie (chaleur - électricité)

A chacun de ces procédés sont attachés différents systèmes dont la connaissance de l'efficacité est nécessaire pour déterminer sans ambiguïté les pertes énergétiques liées à la consommation d'énergie.

Par nature des demandes, nous entendons l'identification quantitative instantanée (diagramme de charge) de la demande en fonction de l'heure, du jour, du mois, de l'année. De plus, la connaissance de la fonction de simultanéité est très importante pour les agents énergétiques distribués par réseau, car elle définit le dimensionnement des infrastructures nécessaires, donc les investissements.

2.1.3. Secteurs d'utilisation

Si on se réfère à la ventilation existante dans les statistiques suisses pour la définition des secteurs d'utilisation, on constate une différence sensible entre les règles adoptées par le Bureau fédéral des statistiques et celles de l'AIE (voir figure B1).

Nous reproduisons dans le tableau ci-dessous la liste des secteurs retenus par chaque organisation.

Nous voyons que les ventilations choisies ne permettent pas de passer sans autre de l'une à l'autre sans interprétation. Par exemple, du côté AIE n'apparaissent ni l'agriculture, secteur pourtant très important, ni l'industrie textile. Pour le Bureau fédéral des statistiques, les transports sont considérés globalement. Dès lors, pour répondre aux exigences mentionnées en 2.1., le futur système statistique énergétique devra permettre, tant au niveau de la saisie des données qu'à celui du traitement de l'information, de satisfaire simultanément des exigences diverses en évitant de recourir à des statistiques "parallèles".

A ce sujet, nous renvoyons aux travaux du groupe de travail ad hoc du Fonds national de la recherche scientifique.

2.1.4. Stockage

L'importance déterminante du stockage dans le choix d'une politique énergétique a toujours été sous-estimée. Pourtant c'est lui qui définit la souplesse de l'utilisation d'un agent énergétique déterminé, sa disponibilité, les risques de rupture d'approvisionnement. Nous considérons deux catégories de stockage :

- . collectif
- . individuel

Bureau fédéral des statistiques	Agence internationale de l'Energie
<p><u>A. Entreprises</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Agriculture 2. Mines et carrières 3. Produits alimentaires, boisson, tabac 4. Industrie textile et de l'habillement 5. Transformation du bois et du liège, voitures d'enfants, jouets 6. Industrie du papier et arts graphiques 7. Cuir caoutchouc et matières plastiques 8. Industrie chimique, traitement du pétrole 9. Mise en oeuvre de la pierre et de la terre 10. Industrie métallurgique 11. Machines et véhicules 12. Industrie horlogère, bijouterie, instruments de musique 13. Bâtiment 14. Electricité, gaz, eau 15. Commerce 16. Banques et assurances 17. Transports, PTT 18. Hôtels et restaurants 19. Hygiène, soins personnels 20. Services divers 21. Location d'immeubles <p><u>B. Administrations publiques et assurances sociales</u></p> <p><u>C. Organisations privées sans but lucratif</u></p> <p><u>D. Services domestiques</u></p>	<p><u>Transformation d'énergie</u></p> <p><u>Industries</u></p> <p>Mine</p> <p>Alimentaire</p> <p>Bois</p> <p>Imprimerie</p> <p>Papier</p> <p>Chimique</p> <p>Fer et Acier</p> <p>Métaux non-ferreux</p> <p>Machines</p> <p>Equipements pour le transport</p> <p>Pierre, Argile, Verre</p> <p>Autres</p> <p><u>Transport</u></p> <p>Route : - automobiles</p> <p style="padding-left: 40px;">- autocars</p> <p style="padding-left: 40px;">- camions</p> <p>Chemin de fer</p> <p>Aérien</p> <p>Maritime</p> <p><u>Résidentiel</u></p> <p><u>Commercial</u></p> <p><u>Militaire</u></p>

Figure B1 : Définition des secteurs d'utilisation.

qui sont caractérisées toutes les deux par leur dimensionnement par rapport à la consommation. A ce propos, l'obligation d'avoir recours à un stockage collectif lorsqu'on passe du système de chauffage au mazout ou au charbon (stockage individuel important) à tout autre système de chauffage lié à un réseau (gaz naturel, chauffage à distance, électricité) n'est habituellement pas suffisamment prise en compte, voire oubliée.

Les types de stockage sont :

- . journalier
- . hebdomadaire
- . mensuel
- . saisonnier
- . annuel.

2.1.5. Secteur Production - Transport - Transformation - Distribution PTTD

Afin de pouvoir évaluer les performances d'une chaîne énergétique, il est nécessaire de connaître les efficacités caractéristiques de chaque étape du système PTTD afin de pouvoir comptabiliser les pertes énergétiques qu'il faut consentir jusqu'à la mise à disposition des agents énergétiques aux consommateurs.

Pour la comparaison qualitative des technologies possibles pour la production et la transformation d'agents énergétiques, il est nécessaire de connaître les niveaux de température entre lesquels le procédé a lieu. Cet aspect est repris plus en détail au chapitre 6 où nous aborderons le bilan exergétique de la Suisse.

2.2. Données disponibles

Bien qu'encore insuffisant en quantité et en qualité le nombre de données disponibles permet déjà une approche grossière de l'image des consommations d'énergie du pays. Le système statistique énergétique disponible a été créé en son temps comme instrument permettant de suivre l'évolution de la consommation de chaque agent énergétique année après année. C'est pourquoi les valeurs statistiques recueillies depuis 1910 donnent une bonne idée globales du développement des quantités annuelles d'énergie fournies aux consommateurs. Ces données sont mises à disposition de l'Office fédéral de l'énergie et du Comité national de la conférence mondiale de l'énergie régulièrement par les producteurs et distributeurs d'agents énergétiques.

A partir de ces valeurs et selon une clef de répartition assez grossière, les quantités d'énergie distribuées ont été réparties entre les grandes catégories d'usages (énergies utiles). Pour évaluer l'ordre de grandeur des demandes et des pertes résultants des différentes technologies d'utilisation, il est admis une efficacité globale moyenne pour chaque agent selon la catégorie d'usage concerné. Cette façon de faire très approximative est suffisante pour donner une image générale de l'année considérée par rapport aux années antérieures, pour faire le point commercialement sur les tendances du marché et pour apprécier l'aspect politique de l'approvisionnement du pays en énergie. Par contre, le développement et l'utilisation d'un modèle énergétique comme outil d'analyse et d'optimisation ne peut plus se satisfaire d'informations aussi générales et imprécises. Le danger est trop grand de voir des décisions importantes prises sur la base d'informations par trop fausses résultant de l'utilisation du modèle. Un autre aspect, qui est à court terme très important, c'est que plus les informations statistiques seront précises et ponctuelles, plus le contrôle du succès de la lutte contre le gaspillage sera efficace. Il est certain qu'actuellement l'importance des économies d'énergie réalisables d'une année à l'autre est inférieure à la valeur absolue des erreurs statistiques cumulées à celles d'appréciation. De plus, il est hasardeux de vouloir prétendre que des économies ont été réalisées dans un secteur plutôt que dans un autre.

Actuellement, les données mentionnées sous 2.1.5. sont pratiquement entièrement disponibles et ont un degré de fiabilité suffisant. Par contre, dans les secteurs d'utilisation finale de l'énergie, bien qu'un gros effort soit fait depuis quelques années pour combler les lacunes, il reste beaucoup à faire pour connaître, comprendre et apprécier les mécanismes de notre consommation d'énergie. Alors il sera réellement possible d'aborder de façon raisonnable et dynamique le problème du remplacement des produits pétroliers.

2.3. Données possibles

Il faut entendre ici les données concernant l'utilisation finale de l'énergie que l'on peut raisonnablement obtenir en plus des données déjà existantes à court, moyen et long terme.

Sous 2.1., nous avons donné la liste des informations souhaitables qui auraient permis une utilisation optimale du modèle énergétique. La disponibilité de l'ensemble des données mentionnées permettrait l'établissement

d'une matrice de consommation de dimension et de précision idéales pour le spécialiste et l'analyste méticuleux. Mais est-ce réaliste ? Nous ne le pensons pas pour plusieurs raisons :

- . Toute statistique individuelle et la saisie des données qui lui est liée, font appel à des moyens en personnel et financiers très importants. La tenue à jour et l'évaluation des informations sont également très coûteuses en temps. Il faut donc à priori éviter de charger le système d'informations répétitives peu importantes ou sans signification.
- . Toute saisie des données entraîne des investissements importants en appareils de mesure qui doivent être surveillés et entretenus. Il n'est pas évident de pouvoir persuader l'ensemble des consommateurs de consentir à un tel effort sans contrainte. Les moyens de contrainte manquent et ne sont pas souhaitables.
- . Certaines consommations d'énergie ne sont pas mesurables directement et leurs prestations finales doivent être évaluées (p.ex. énergie solaire, pompe à chaleur). Dans ces cas, il s'agira de déterminer les caractéristiques moyennes annuelles de ces technologies en fonction des conditions extérieures moyennes rencontrées.
- . Néanmoins, il existe de grandes catégories de consommateurs-type dont les caractéristiques de consommation sont semblables et ne se modifient que très lentement dans le temps. L'étude et la vérification sur un échantillonnage caractéristique de chaque catégorie sont suffisamment représentatives pour simplifier la saisie des données et la faire à des espaces de temps raisonnables.

Ces considérations étant faites, il est nécessaire de connaître la répartition de la consommation d'énergie par secteurs d'utilisation définis sous 2.1.3.. Pour ce faire, il est nécessaire de réaliser la saisie des données le plus en détail possible dans les secteurs gros consommateurs (par exemple, par enquête individuelle quinquennale auprès de tous les consommateurs). Pour les autres secteurs, les informations pourraient être fournies dans le cadre des enquêtes statistiques fédérales décennales (statistiques de la population, statistiques des entreprises). Ces enquêtes serviront à vérifier et à redéfinir la clef de répartition des consommations entre les secteurs d'utilisation pour les années intermédiaires.

A l'intérieur de ces secteurs, la consommation selon les usages cités sous 2.1.2. sera distribuée conformément à la clef de répartition propre au secteur considéré.

Ce que nous espérons :

- . pour le court terme (2 ans)

c'est la réalisation rapide d'une enquête individuelle auprès des consommateurs des secteurs gros consommateurs (résidentiel, transport, industrie).

- . pour le moyen terme (3-5 ans)

c'est la connaissance de la clef de répartition entre tous les secteurs définis.

- . pour le long terme (10 ans)

c'est la connaissance de la clef de répartition entre les différents usages à l'intérieur des secteurs. Cette étude, qui d'ailleurs est déjà commencée dans certains secteurs, doit se poursuivre en s'intensifiant afin de pouvoir disposer d'un échantillonnage suffisant donc représentatif et toucher l'ensemble des secteurs dans les dix années à venir.

Nous relevons que pour les informations relatives au stockage et caractérisé sous 2.1.4., il n'existe encore rien, mais qu'une enquête est en cours depuis quelques années déjà auprès des cantons dans le but d'établir l'inventaire et le cadastre des installations de stockage. La disponibilité de ces informations devrait se situer dans le moyen terme.

2.4. Structure du système de saisie des données à envisager

Les problèmes politiques et économiques soulevés par la situation du marché mondial de l'énergie ont eu pour effet d'accélérer également dans notre pays la mise en oeuvre des moyens pour l'amélioration de la connaissance, de l'analyse et de la justification de la consommation nationale d'énergie. Les milieux responsables sont sensibles à l'utilité et à l'importance d'un système statistique sûr et aussi précis que possible pour pouvoir établir de façon objective et réaliste les éléments de décision que l'on attend d'eux. C'est pour répondre à cette nécessité qu'un groupe de travail, sur le plan national, étudie les bases à donner à un cahier des charges pour un nouveau système de statistiques énergétiques qui établira la nature des données statistiques et la fréquence de leur saisie.

Comme nous l'avons déjà relevé sous 2.2., les statistiques jusqu'aux valeurs globales de la distribution sont suffisantes, donc la méthode satisfaisante. On peut considérer que le secteur PTTD a un caractère national (le kWh produit à l'usine de Lavey sera livré quelque part en Suisse, l'huile

de chauffage sera livrée de Bâle à Fribourg). Les valeurs statistiques de ce secteur ont une portée générale et il est juste qu'elles soient traitées de façon centralisée (Office fédéral de l'énergie). Ce système de traitement de l'information appliqué depuis de nombreuses années a prouvé sa cohérence, sa faisabilité et sa fiabilité. Par contre, l'effort principal de développement des statistiques doit être porté sur les secteurs d'utilisation finale de l'énergie. A part l'énergie pour les transports, qui représente environ 20% de la consommation, le 80% restant couvre les autres usages (lumière, procédés chimiques, usages thermiques) et est consommé localement, c'est-à-dire de façon géographiquement fixe, donc climatiquement et politiquement déterminé. Le nombre de consommateurs se chiffre par millions, ce qui rend illusoire un système de saisie des données centralisé sur le plan national : d'ailleurs un tel système entraînerait des incompatibilités constitutionnelles (ingérence fédérale au niveau cantonal). Par contre, l'introduction d'un système décentralisé en cascade : confédération, canton, commune, avec coordination régionale présente l'avantage de pouvoir utiliser les infrastructures cantonales existantes (bureau cantonal des statistiques) auxquelles il s'agit d'ajouter un volet "énergie". Les cantons peuvent déléguer aux communes le soin de rassembler les informations statistiques demandées, tout en gardant la responsabilité de les transmettre selon la forme souhaitée à l'Office fédéral de l'énergie. De telles approches ont déjà été réalisées par certains cantons qui ont étudié leur conception cantonale de l'énergie ; il en va de même pour certaines grandes agglomérations qui ont fait des études semblables pour leur région. Donc à priori, l'esquisse des structures existe déjà, il s'agit de les renforcer.

2.5. Méthodes d'évaluation des données inaccessibles directement

Afin de nous permettre de réaliser nos recherches malgré l'absence totale de certaines données utiles, nous avons été contraints de faire des estimations. Pour y parvenir, nous avons fait un certain nombre d'hypothèses, évaluées par similitude ou quantifiées par déduction.

2.5.1. Hypothèses

Les hypothèses que nous avons faites portent sur les usages thermiques domestiques et sont essentiellement relatives au chauffage des locaux et à l'eau chaude sanitaire. Par extension, nous avons admis que :

- . la consommation globale d'énergie est proportionnelle à la population et varie en sens inverse de la température moyenne hivernale de l'environnement pour la région considérée, conformément aux observations faites dans la pratique.
- . on a admis comme valeur représentative la consommation moyenne annuelle d'énergie par appartement et par agent énergétique
- . les mouvements de populations étrangères (tourisme, affaires) représentent une augmentation apparente de population d'environ 1% dont la moitié est imputée à la région des Alpes (tourisme d'hiver).

2.5.2. Similitudes

Pour caractériser dans le temps les mécanismes de consommation*, nous avons admis que l'allure des diagrammes de charge journaliers, mensuels, saisonniers et annuels des agents énergétiques distribués par réseaux (électricité, gaz et surtout chauffage à distance) correspondait de façon générale à la nature des demandes en chauffage.

A partir de là, nous avons déterminé les valeurs extrêmes (maximum et minimum) et moyennes des puissances instantanées appelées. Toutefois, les informations données par ces diagrammes doivent être interprétées préalablement pour qu'une telle approche soit valable. Il faut en effet bien établir dans ces diagrammes la part des consommations à caractère industriel de celle des demandes domestiques, et ne retenir que cette dernière.

2.5.3. Déduction

Dans certains cas, nous avons disposé de résultats d'enquêtes partielles ou d'études faites sur un échantillonnage de catégories de consommateurs. Après analyse des sources consultées, nous avons apprécié de façon subjective le degré de représentativité des résultats communs et nous les avons complétés en appliquant des coefficients de correction choisis en fonction des connaissances et expériences personnelles.

Dans les trois méthodes d'évaluation décrites sommairement, il est clair que les résultats obtenus sont entachés d'imprécision. Cependant, les ordres de grandeurs sont respectés et la précision est suffisante pour illustrer valablement la valorisation du modèle énergétique. Il faudra toutefois rester très prudent dans les conclusions que l'on sera amené à tirer du modèle à ce stade des connaissances et tenir compte de la relativité des informations disponibles pour le moment.

* à usage thermique

3. EVOLUTION DE LA CONSOMMATION GLOBALE D'ENERGIE PRIMAIRE DE 1950 A NOS JOURS (Réf. 5)

La première moitié du XXème siècle a été caractérisée par une très faible progression de la consommation spécifique d'énergie par habitant (taux annuel moyen pour la période : 0.8%). Ce phénomène de stabilité s'explique par les deux guerres mondiales 1914-1918 et 1939-1945 et la crise des années 30 qui ont considérablement gêné le progrès économique et social. Cependant, les impératifs techniques de la deuxième guerre mondiale ont entraîné le développement très rapide de nouvelles technologies dont les retombées sur le plan civil donneront le départ à la progression extraordinaire de ces 25 dernières années. Cet emballement économique, conditionné par une industrialisation à outrance, a entraîné une augmentation constante de la consommation d'énergie à un taux en rapport avec l'amélioration des conditions de vie. Cette dernière constatation résulte du fait que, pendant toute cette période et jusqu'en 1973 date du début de la dite "crise du pétrole", le prix de l'énergie et des produits pétroliers en particulier a été extrêmement bas, ce qui a permis à l'ensemble de la population d'en faire un usage toujours plus large. En l'absence de phénomènes dissuasifs, notre comportement de consommateur a donné toujours plus de place au gaspillage. Les trop grandes facilités de consommation des années passées nous ont fait prendre beaucoup de mauvaises habitudes qui se réclament plus de la paresse et d'un pseudo-bien-être apparent et trompeur que d'une nécessité vitale ou d'une amélioration réelle de la qualité de vie. N'oublions pas que s'il existe un besoin minimum vital d'énergie pour assurer la survie de l'individu, rien par contre ne permet de limiter à priori sa demande, si ce n'est l'offre !

3.1. Consommations globales

Les dernières statistiques publiées par l'Office fédéral de l'énergie pour l'année 1978 nous donnent l'évolution de consommation suivante pour les principaux agents énergétiques.

3.1.1. Consommations d'énergie au niveau des derniers consommateurs

	Produits pétroliers PJ/an	Gaz PJ/an	Charbon PJ/an	Bois PJ/an	Electricité PJ/an	Total PJ/an
1950	42,8	5,3	74,7	21,7	33,7	178,2
1960	151,4	5,8	76,9	14,5	63,0	311,6
1970	475,2	7,8	27,3	10,1	99,2	619,6
1973	563,5	11,9	14,8	10,1	113,4	713,7
1974	500,2	15,1	12,7	8,4	116,9	653,3
1976	492,3	25,1	8,6	8,4	118,7	653,1
1978	516,4	32,4	9,8	7,9	128,3	694,8

3.2. Pétrole

Sans les produits pétroliers, les chiffres de consommation sont :

3.2.1. Consommation d'énergie sans les produits pétroliers

En partant du tableau 3.1.1. on obtient les valeurs suivantes :

	Consommation en PJ/an
1950	135,4
1960	160,2
1970	144,4
1973	150,2
1974	153,1
1976	160,8
1978	178,4

3.2.2. Bâtiment

Il est notoire que depuis 1950, le chauffage des nouveaux bâtiments a été conçu pour l'utilisation systématique du mazout comme agent énergétique.

D'autre part la densité d'occupation des appartements a été très sensiblement diminuée pendant la période considérée, ce qui se traduit par une

augmentation du volume habitable par habitant, donc une demande en chauffage accrue proportionnellement.

Evolution du secteur "bâtiment" :

1955	1 055 000	appartements	} Recensement partiel des appartements dans les localités de 2000 habitants ou plus
1960	1 192 000	"	
1970	1 606 000	"	
1973	1 863 000	"	
1974	2 468 000	"	2.6 hab/app. } Recensement pour l'ensemble de la Suisse
1976	2 557 000	"	2.5 hab/app. }

Pour la période considérée, on constate une augmentation de l'ordre du million de logements. Il faut en plus tenir compte des nombreuses conversions au mazout de systèmes de chauffage existants. Les avantages et les facilités offertes par l'utilisation des huiles de chauffage ont entraîné une généralisation des systèmes de chauffage central. Ces systèmes, contrairement au chauffage individuel par local, permettent d'assurer une température uniformisée dans l'ensemble des volumes habitables qu'ils soient occupés ou non. Ceci entraîne une augmentation substantielle de la consommation d'énergie pour le chauffage des locaux qui se traduit par les chiffres mentionnés au tableau 3.1.1..

3.2.3. Transport

Le développement très rapide des moyens motorisés de transport individuel est aussi une cause de l'augmentation spectaculaire de la consommation de produits pétroliers. Le parc de véhicules (camions, autobus, automobiles, motocycles) a évolué de la façon suivante :

Evolution du parc suisse de véhicules motorisés

Année	Nb de Véhic.
1950	264 487
1960	865 106
1970	2 187 648
1973	2 564 169
1974	2 669 172
1976	2 804 900
1978	3 139 892

3.2.4. Industrie

Cette branche a également profité des avantages de l'utilisation des produits pétroliers. Cependant le manque de chiffres précis ne nous permet pas de définir exactement la participation de ce secteur à l'augmentation de la consommation de produits pétroliers. Sans être négligeable, la part prise par l'industrie à cette augmentation reste modeste par rapport aux secteurs du chauffage des bâtiments et des transports.

3.3. Gaz

Jusqu'en 1968, le gaz a été en Suisse une énergie intermédiaire obtenue par une transformation :

- . par distillation de la houille
- . par cracking d'essences légères.

Ce dernier procédé n'aura été utilisé qu'un peu plus de 10 ans.

Le développement de cet agent énergétique correspond à l'arrivée en Suisse du gaz naturel et la mise en place de toute l'infrastructure de distribution. Depuis 1968, l'importance du gaz naturel dans la couverture des demandes énergétiques suisses ne cesse de croître.

3.4. Charbon

Cet agent qui, jusqu'en 1950, a couvert jusqu'à 80% et plus de nos demandes énergétiques a été relégué très rapidement par les produits pétroliers au rang de figurant dans le bilan énergétique de la Suisse. Disponible en plus grande quantité que les produits pétroliers, mais d'extraction plus onéreuse pour le moment, d'utilisation moins commode, le charbon, grâce à la mise au point de nouvelles technologies d'utilisation, regagnera certainement une partie du terrain perdu.

3.5. Bois

Source d'énergie indigène (la seule avec les forces hydrauliques), le bois fut, est et restera un agent énergétique modeste au bilan énergétique de la Suisse. Si en valeur absolue, la quantité de bois consommée pourra être augmentée, il ne faut pas s'attendre à ce que cet agent joue un rôle important dans l'économie énergétique.

3.6. Electricité

De part son importance, l'électricité, vecteur d'énergie intermédiaire (et non pas énergie primaire comme elle est trop souvent considérée), mérite quelques commentaires. La multitude des applications possibles, sa disponibilité pratiquement assurée en ont fait une sorte d'institution qui devient de plus en plus la victime des services qu'on lui demande et qu'elle rend. D'un usage devenu inconscient par excès de simplicité, elle a trouvé une application dans pratiquement tous les domaines, même dans ceux auxquels sa noblesse ne devrait pas la destiner (p.ex. chauffage des locaux, usages thermiques à basse température).

L'augmentation de la consommation a été très régulière au cours de ces 25 dernières années, avec un taux moyen de croissance annuelle de 5%. Jusqu'en 1965, toute l'énergie électrique consommée en Suisse était de provenance hydraulique à l'exception de quelques groupes de turbines à gaz pour couvrir les pointes de charge et de groupes de turbine à vapeur de l'industrie ou des services publics. Cependant cet apport est toujours resté extrêmement modeste (ordre de grandeur de la quantité d'énergie fournie env. 1%).

L'utilisation systématique de toutes les ressources hydrauliques disponibles a entraîné le recours à la production d'électricité par voie thermique. Tout d'abord en 1964-1965 avec la mise en service de la centrale thermique au fuel de Chavalon, en 1969 et 1972 par les mises en service des centrales nucléaires de Beznau I et II ainsi que de Mühleberg. En 1979 la centrale nucléaire de Gösgen apporte à elle seule une production de 7000 GWh/an (25 PJ/an) sous forme d'énergie électrique. Ce chiffre, important en regard de la demande d'énergie électrique, reste modeste en face des 500 PJ/an demandés aux produits pétroliers.

4. BILAN ENERGETIQUE (Réf. 1, 2, 3, 4, 16)

L'analyse des consommations d'énergie pour une année donnée nous conduit à la tenue d'une comptabilité énergétique à partir de laquelle on peut établir le bilan énergétique.

4.1. Méthode adoptée

A partir des statistiques de l'Office fédéral de l'énergie on a établi

le diagramme des flux d'énergie du niveau primaire, c'est-à-dire de celui où l'énergie se trouve à l'état brut dans la nature, jusqu'au niveau utile, en passant par les différentes étapes de transformation, de transport et de distribution. A chaque maillon de ces chaînes énergétique on évalue les pertes qui se portent en diminution des flux d'énergie. La représentation graphique que nous avons choisie donne une image très parlante de la situation réelle et montre directement les différentes valeurs relatives caractérisant le bilan énergétique.

4.2. Choix de l'année de référence

Nous avons choisi 1974 comme année de référence parce que :

- . les valeurs statistiques existantes étaient disponibles en totalité dans des délais compatibles avec la durée limitée du P.E. ENERGIE.
- . le choc psychologique créé par la crise du pétrole de l'automne 1973 a rendu le consommateur conscient de la valeur de l'énergie qu'il consomme ; il en résulte une certaine disposition à essayer de limiter le gaspillage d'énergie.
- . les incidences économiques possibles sur le plan mondial résultant de cette nouvelle arme politique qu'est devenu le pétrole, entraînent une remise en question des plans de développement démesurés et une retenue certaine vis-à-vis de nouvelles demandes en énergie parfois mal justifiées.
- . ce climat particulier entraîne un ralentissement conjoncturel sensible qui ouvre une période de consolidation et d'analyse de notre système économique ; aujourd'hui, cette période de réflexion est loin d'être terminée, d'autant moins que sur le plan politique mondial, les problèmes de l'énergie restent au centre des préoccupations et des pourparlers au plus haut niveau.
- . cette situation générale entraîne, à notre avis, un comportement un peu mieux équilibré du consommateur à l'égard de sa demande d'énergie.

Il faut toutefois constater que, malgré les nombreux appels pour économiser l'énergie, la demande totale d'énergie continue à croître plus rapidement que la population.

1974 : 11,49 GW = 363 PJ/an (au niveau utile)

1978 : 12,35 GW = 390 PJ/an (" " ")

4.3. Bilan 1974

Le bilan énergétique suisse en puissances moyennes 1974 de la figure B2 laisse apparaître les valeurs suivantes :

	GW	%
Niveau primaire	23.62	100
Niveau intermédiaire	19.93	84
Niveau utile	11.49	49

Constatation :

La disponibilité de la quantité d'énergie nécessaire à satisfaire nos demandes entraîne en amont une perte plus qu'équivalente.

Nous consommons l'énergie avec une efficacité inférieure à 0.5.

4.3.1. Répartition des demandes utiles par usage

La répartition des demandes selon les 4 grandes catégories se distribue de la façon suivante :

	GW	%
Niveau utile	11.49	100
Lumière	0.03	0.3
Procédés chimiques	0.44	3.8
Usages mécaniques	2.03	17.7
Usages thermiques	8.99	78.2

4.3.2. Répartition des demandes utiles par agent énergétique

	GW	%
Niveau utile	11.49	100
Pétrole	8.37	72.8
Gaz	0.31	2.7
Charbon	0.21	1.8
Bois	0.14	1.2
Electricité	2.46	21.5

BILAN ENERGETIQUE SUISSE EN PUISSANCE MOYENNE 1974

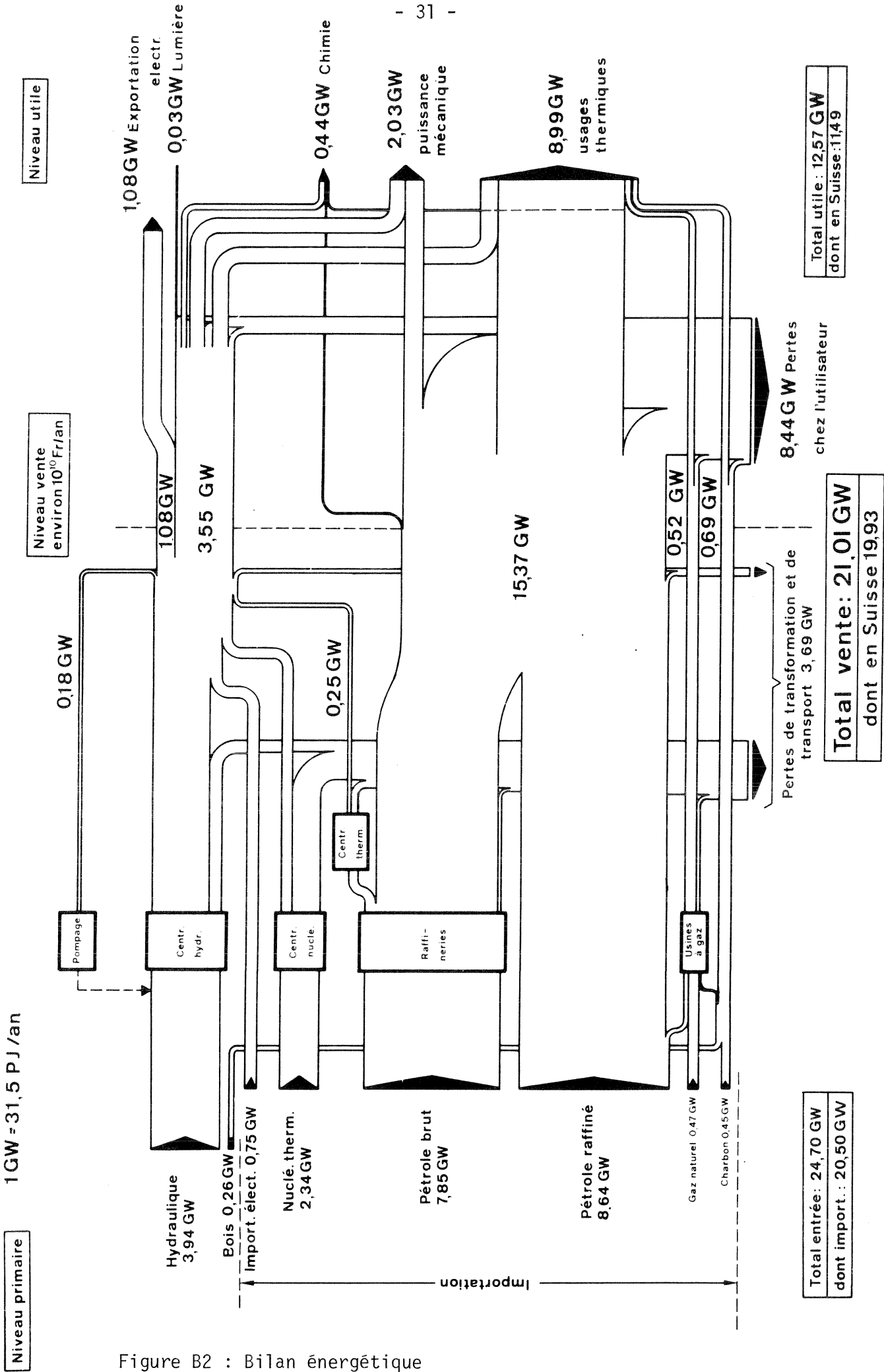


Figure B2 : Bilan énergétique

Les chiffres ci-dessus font ressortir que les demandes (niveau utile) sont satisfaites pour 72.8% par les produits pétroliers ou pour 93.3% par les produits pétroliers et l'électricité. Cette constatation fait ressortir la précarité de notre politique énergétique :

- . Nous sommes entièrement tributaires de l'étranger pour notre approvisionnement en produits pétroliers. Ceux-ci proviennent de pays aux régimes politiques peu stables d'une part, et sont devenus des armes politiques d'autre part.
- . Les sources indigènes (forces hydrauliques) propres à la production d'électricité sont pratiquement entièrement utilisées et représentent une participation globale de 16.1% à la satisfaction des demandes. Pour les 5.4% restant les producteurs d'électricité sont tributaires des approvisionnements à l'étranger sous forme de combustible nucléaire (uranium) et fossile (huile lourde).

4.3.3. Degré d'autarcie pour la satisfaction de nos demandes d'énergie

Au vu des constatations précédentes et compte-tenu de la consommation de bois qui augmente un peu les ressources énergétiques indigènes, nos demandes en énergie utiles sont satisfaites de façon suivante en valeurs relatives et en fonction de leur provenance :

- . indigène 17.3 %
- . étrangère 82.7 %

Dès lors, une question se pose : peut-on délibérément maintenir, sinon aggraver, notre comportement et notre appétit énergétique alors que notre faim est essentiellement rassasiée par des sources qui ne nous appartiennent pas et sur lesquelles nous n'avons ni contrôle ni influence ? Ceci est valable pour nos demandes en énergie ! Malheureusement, vu au niveau de l'approvisionnement international (niveau primaire) les rapports se dégradent encore. Si on considère l'importance relativement négligeable (<1%) de la Suisse dans la consommation mondiale d'énergie, ce problème touche en fait assez peu l'économie mondiale et n'a guère plus d'importance que la fourniture en énergie d'une grande ville, du Luxembourg, du Lichtenstein ou d'Andorre.

4.3.4. Degré d'autarcie dans l'approvisionnement national en énergie

En remontant les flux d'énergie de notre système énergétique, des différentes demandes jusqu'au niveau primaire correspondant à celui de l'approvisionnement, nous constatons que la répartition par source d'énergie se présente de la façon suivante :

Sources	GW	%
Hydraulique *	3.61	15.3
Bois	0.26	1.1
Nucléaire (thermique)	2.34	9.9
Pétrole	16.49	69.8
Gaz	0.47	2.0
Charbon	0.45	1.9
Total	23.62	100

* En déduction : 0.33 GW à porter sur le compte des excédents d'exportation, par rapport au 3.94 GW portés au bilan.

Il en résulte la constatation suivante relative au degré de dépendance de notre approvisionnement en énergie.

Niveau Source	Primaire	Utile
Indigène	16.4 %	17.3 %
Etrangère	83.6 %	82.7 %

Il est évident que l'ordre de grandeur reste le même dans les deux cas, mais la tendance est significative. Elle résulte de la situation décrite sous 3.6. ayant trait au choix de centrales thermiques comme nouvelle source de production d'énergie électrique. Ce type de centrale, quelle que soit la nature du combustible envisagé (charbon, pétrole, nucléaire) a un rendement nettement inférieur (environ de moitié) à celui des centrales hydrauliques. Donc, à toute augmentation de la demande en électricité correspondra, à l'avenir, une augmentation de la dépendance de notre économie énergétique vis-à-vis des sources d'approvisionnement étrangères, aggravée par les pertes de transformation importantes liées au processus de production par voies thermiques.

4.3.5. Efficacité* moyenne d'utilisation finale de l'énergie à partir des sources primaires

Les valeurs que nous rendons ci-dessous, sont celles établies à partir des valeurs statistiques pour l'année 1974 de l'Office fédéral de l'énergie.

Agent énergétique	Niveau Primaire GW	Niveau Utile GW	Efficacité Moyenne %
Bois	0.26	0.13	50
Charbon	0.43 ¹	0.24	56
Pétrole	15.70 ²	8.36	53
Gaz	0.61	0.31	51
Electricité	6.62 ³	2.45	37
Total	23.62	11.49	49

¹ Déduction faite de la part destinée à la production de gaz

² Déduction faite de la part destinée à la production d'électricité et de gaz

³ Sont pris en compte : l'équivalent énergétique des formes hydrauliques mises en oeuvre, l'équivalent énergétique de l'uranium consommé dans les centrales nucléaires et la quantité de produits pétroliers consommés pour la production d'électricité

5. MATRICE DES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES

La connaissance globale du marché de l'énergie telle que nous l'avons présentée au chapitre précédent, pour intéressante qu'elle soit, n'est pas suffisante pour une appréciation qualitative des demandes. Pour cela, il devient nécessaire de mieux connaître qui consomme quelle énergie et pour satisfaire quel usage. Ceci conduit à l'établissement d'une matrice des consommations dont le degré de précision des informations y figurant est fonction de la qualité des données disponibles et de l'importance économique ou politique des grandeurs considérées.

* L'efficacité est le quotient de la part utile de l'énergie par la quantité totale d'énergie consommée pour obtenir une prestation donnée. On utilise aussi le terme de rendement énergétique.

5.1. La matrice de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE)

L'Agence Internationale de l'Energie (AIE) a été créée à la suite de la crise politique de 1973 qui a démontré que les problèmes de l'énergie étaient de dimension planétaire. La Suisse en fait partie et a été invitée, comme les autres nations membres, à dresser sur un modèle établi la matrice de ses consommations pour 1974. A cette occasion, le P.E. ENERGIE a été mandaté pour effectuer ce travail qui répondait également à l'une de ses préoccupations. Nous avons utilisé les résultats obtenus pour la suite du projet, sans modifier la structure de la matrice proposée. Celle-ci est reproduite à la figure B3.

Comme nous l'avons déjà dit au chapitre 2, la plupart des données nécessaires à l'établissement de la matrice faisaient défaut. En puisant les informations partielles à plusieurs sources différentes, il en est résulté un certain nombre d'incohérences dues à des écarts statistiques difficilement explicables, souvent incompréhensibles. Nous ne les avons pas corrigés, car nous n'avons pas pu identifier avec suffisamment de certitude les données les moins fausses. Nous avons préféré reproduire l'image de l'imperfection du système statistique existant en regard des informations nécessaires à l'analyse d'un modèle énergétique. Nous signalons également que les valeurs figurant dans la matrice entre parenthèses sont des répartitions subjectives faites en l'absence de toute autre information, ou des totaux dans lesquels interviennent de telles valeurs de répartition. Même si ces valeurs devaient s'avérer fausses, il n'y aurait aucune incidence fâcheuse sur l'ensemble, car les erreurs ainsi introduites restent dans la marge d'erreurs statistiques habituelles.

5.2. Avantages et inconvénients de la matrice

5.2.1. Avantages

Le plus gros avantage que représente cette matrice, c'est de préciser la nature des informations statistiques nécessaires à la tenue d'une comptabilité énergétique détaillée. En définissant le degré de sensibilité souhaitée de cette dernière, la matrice s'identifie à un cahier de charge pour le système statistique chargé de l'alimenter en informations. Une fois les routines de saisies des données prises, tous les travaux peuvent être traités par l'informatique. La configuration de la matrice permet d'évaluer numéri-

quement tous les maillons et tous les noeuds des chaînes énergétiques du modèle existant, et de servir ainsi de référence pour toutes études partielles ou totales de transformation du modèle.

5.2.2. Inconvénients

Nous avons constaté les deux inconvénients majeurs suivants :

- A part la rubrique réservée aux pertes par transport (n° 56), la valeur effective des pertes aux différents niveaux production-transformation ne peut être connue que par déduction. Au niveau de la consommation finale par contre, il est impossible d'en connaître l'importance. Ceci nous paraît être une grande lacune car elle ne permet pas :
 - . de localiser les consommations d'énergie entraînant un gros gaspillage
 - . d'évaluer valablement les quotients de réussite dans la lutte contre le gaspillage
 - . d'apprécier convenablement dans le bilan global les effets de substitution d'agents énergétiques pour un usage déterminé.
- Rien ne permet de définir la demande réelle, au niveau de la consommation finale. On ne connaît que la quantité d'énergie consommée, sans pour autant pouvoir apprécier sur le plan énergétique le rapport "consommation-prestation réelle". Bien qu'étant difficile à cerner, compte tenu de la diversité des technologies possibles pour satisfaire la même demande, il reste souhaitable de mieux connaître les efficacités réelles de chaque technologie appliquée à chaque agent énergétique afin de mieux juger l'opportunité de l'emploi d'une technologie ou du choix d'un agent énergétique pour satisfaire une demande donnée.

6. BILAN EXERGETIQUE (Réf. 1, 3, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 17)

Dans les chapitres précédents, nous nous sommes intéressés à la connaissance quantitative de la consommation des différents agents énergétiques. Ici, nous allons aborder l'analyse qualitative de la consommation d'énergie en fonction de la nature des demandes. C'est l'introduction de la notion d'exergie, résultant de la mise en oeuvre simultanée des 1er et 2ème principes de la thermodynamique, qui nous permet une nouvelle appréciation des moyens utilisés pour satisfaire l'ensemble des demandes.

La comptabilité exergétique fait intervenir :

- . les exergies mécanique et électrique (équivalentes aux énergies dites nobles, de même nom)
- . l'exergie-chaleur (travail réversible maximum correspondant à une chaleur transférée à une température donnée, par rapport à la température extérieure)
- . l'exergie-transformation (travail réversible maximum correspondant à une transformation thermodynamique)
- . les pertes exergétiques (appelées aussi "pertes thermodynamiques") correspondant à des irréversibilités, à la dégradation de l'énergie.

Si l'on fournit ou soutire de l'énergie à un système donné, on le fait passer d'un état à un autre. Ce nouvel état peut être caractérisé par de nouvelles fonctions d'état thermodynamiques (coénergie, coenthalpie) exprimant son potentiel exergétique. Les notions d'exergie et de puissance exergétique permettent d'attribuer à une prestation donnée une valeur de travail qui tient compte du niveau relatif de température à laquelle la prestation est soit fournie, soit utilisée.

A la limite, la totalité de l'énergie consommée se dégrade en chaleur qui est inéluctablement dissipée dans l'environnement atmosphérique. Ce dernier état vers lequel tendent systématiquement toutes les chaînes énergétiques est défini comme étant le point à potentiel exergétique nul.

L'exergie-chaleur permet de qualifier l'ensemble des demandes thermiques qui représente environ 80% de la consommation d'énergie en Suisse. Nous allons donc procéder à l'analyse des demandes thermiques par rapport à l'environnement. De tous les paramètres liés à l'environnement, quel que soit le système considéré ouvert ou fermé, il est démontré que la température atmosphérique T_a est de loin le plus important, et que d'autres, tels que la pression, la composition chimique, peuvent être négligés en première approximation.

6.1. Méthode

6.1.1. Définition de l'exergie dans le cas d'un transfert-chaleur

La puissance exergétique \dot{E}_q peut être considérée comme la puissance mécanique minimale théoriquement nécessaire pour fournir un flux thermique \dot{Q} , à une température T , lorsque la température extérieure est T_a . Selon le

deuxième principe de la thermodynamique, on peut écrire :

$$\dot{E}_q = \theta \cdot \dot{Q}$$

où \dot{Q} = flux thermique fourni par le système à la température T

$$\theta = \text{facteur de Carnot, défini par } \theta = \frac{T - T_a}{T} = 1 - \frac{T_a}{T}$$

où T_a = température absolue de l'atmosphère [K]

T = température absolue à laquelle la chaleur est transférée [K]

$$\text{Si } T = T_a \quad \theta = 0 \quad \text{et} \quad \dot{E}_q = 0$$

Lors de tout transfert ou transformation d'énergie, on peut définir le rendement exergetique de l'opération par :

$$\eta_{ex} = \frac{\sum \text{exergies utiles cédées par le système}}{\sum \text{exergies reçues par le système}}$$

Dans le cas des usages thermiques, en admettant que la puissance exergetique est fournie sous forme calorifique, on peut poser que

$$\eta_{ex} = \theta \cdot \eta_{én}$$

où $\eta_{én}$ = efficacité énergétique du système considéré.

Donc, pour établir un bilan exergetique et pour son analyse, il est nécessaire de connaître ou de fixer un certain nombre de paramètres :

\dot{Q} le flux thermique utile consommé

T_a la température ambiante (environnement)

T le niveau de température utile auquel le transfert aboutit

$\eta_{én}$ l'efficacité énergétique du transfert ou de la transformation d'énergie considérée.

Ces grandeurs permettent de calculer la puissance exergetique utile \dot{E}_q ou la puissance minimale théorique que consommerait une machine de Carnot pour fournir la prestation demandée.

\dot{Q} est connu par le bilan énergétique

T_a doit être tiré des valeurs moyennes qui ressortent des observations faites en plusieurs endroits du pays et des statistiques de la Centrale Suisse de Météorologie

T sera fixé en fonction de la nature des demandes

$\eta_{én}$ est plus ou moins bien connu actuellement, selon la technologie de consommation finale de l'énergie.

6.1.2. Détermination des températures de référence T_a

Afin de déterminer la température atmosphérique de référence T_a nécessaire à l'expression du facteur de Carnot, nous faisons le choix simplificateur suivant :

La Suisse est divisée en 3 zones climatiques de référence :

Zone I : comprise entre 200 et 400 m d'altitude et comprenant

- . Sud du Tessin
- . Région de Bâle
- . Vallée du Rhône jusqu'à Sion
- . Rives lémaniques

Zone II : comprise entre 400 et 800 m d'altitude

- . Plateau suisse

Zone III : au-delà de 800 m d'altitude

- . Jura
- . Alpes

Dans chacune de ces zones, nous prenons un échantillonnage représentatif de localité pour lesquelles la valeur moyenne des températures classées sur plusieurs années. Les valeurs retenues correspondent, soit à la période de chauffage, soit à l'ensemble de l'année pour les autres usages thermiques. Ces valeurs sont corrigées en fonction des conditions climatiques réelles pour 1974 ce qui nous donne la tableau suivant.

		Température moyenne	
		K	°C
Zone I	période de chauffage	279,15	6,0
	année 1974	283,75	10,6
Zone II	période de chauffage	278,05	4,9
	année 1974	282,45	9,3
Zone III	période de chauffage	274,75	1,6
	année 1974	277,65	4,5

Remarque

Si l'on pondère les températures moyennes ci-dessus par le nombre d'habitants par zone (voir sous 6.2.2.), on obtient des valeurs moyennes pour l'ensemble de la Suisse qui sont très voisines de celles de la zone II (278,0 K et 282,35 K).

6.1.3. Choix des températures de transfert T

Nous avons fixé les températures de transfert selon la subdivision indiquée sous 2.1.2.. Les usages frigorifiques n'ont pas pu être pris en considération par manque d'informations suffisantes et l'énergie correspondante consommée est répartie dans les autres catégories. Nous avons donc retenu les températures figurant dans le tableau ci-dessous.

	Température	
	°C	K
Chauffage des locaux	20	293,15
Eau chaude sanitaire	50	323,15
Cuisson	150	423,15
Procédés industriels	500	773,15

6.1.4. Efficacités énergétiques

Nous avons repris les efficacités énergétiques moyennes par agents indiqués dans les statistiques de l'Office fédéral de l'énergie. Nous n'avons pas tenu compte des différences pouvant exister entre telle ou telle technologie appliquée à un agent énergétique, car pour ce faire il aurait fallu connaître :

- . la liste exhaustive des technologies possibles
- . les dimensions de équipements
- . l'allure des efficacités à pleine charge et à charge partielle
- . l'endroit où est utilisée telle technologie.

Tant d'informations non disponibles modifieraient certes le résultat final mais d'une façon ne justifiant pas un effort aussi considérable. Les approximations auxquelles nous sommes conduits pour ventiler les usages thermiques font que la simplification introduite au niveau des efficacités est acceptable.

	Unité : GWh/an	Bois	Charbon	produits pétroliers	Gaz	Electricité	Total
	Consomm. finale	2320	3745	134695	4537	29371	174668
Industrie	Chimie	--	535	1279	--	2821	4635
	Chaleur	--	1415	29186	1772	1330	33703
	Trav. méc.	--	--	171	--	8717	8888
	Total	--	1415	29357	1772	10047	42591
	Lumière	--	--	--	--	2443	2443
Transport	Trav. méc.	--	--	43342	--	2025	45367
Résidentiel	Chauffage	1515	914	37832	1409	374	42044
	Eau chaude	136	--	5916	587	1348	7987
	Autres	136	--	123	587	3874	4720
	Total (A)	1787	914	43871	2583	5596	54751
Commercial	Chauffage	481	692	9735	106	112	11126
	Eau chaude	52	66	2022	24	430	2594
	Autres	--	123	5089	52	5897	11161
	Total (B)	533	881	16846	182	6439	24881
	Total (A+B)	2320	1795	60717	2765	12035	79632

Figure B4 : Répartition de la consommation des différents agents énergétiques par secteurs d'utilisation (1974).

6.2. Ventilation des usages thermiques

Une première répartition globale par secteurs d'utilisation est donnée par la matrice des consommations de l'Agence Internationale de l'Energie. Elle est résumée par le tableau de la figure B4.

Afin d'affiner la distribution par zone pour permettre le calcul des valeurs exergetiques correspondantes, nous nous sommes appuyés sur certains critères que nous donnons ci-dessous.

6.2.1. Chauffage des locaux

Nous avons tenu compte de deux secteurs particuliers.

● Secteur résidentiel et commercial

Nous avons retenu deux critères de répartition :

- . nombre de logements par zone selon le type d'agent énergétique utilisé pour le chauffage
- . température extérieure T_a des trois zones pour la période de chauffage telles qu'indiquées au tableau 6.1.2. permettant de déterminer la différence de température entre l'intérieur des locaux et l'extérieur.

● Secteur industriel

La part d'énergie consommée par l'industrie pour le chauffage de ses locaux représente le 40% de la consommation totale de ce secteur pour tous les agents énergétiques sauf l'électricité. Pour cette dernière nous avons retenu une cote-part de seulement 10%.

La grande majorité de l'industrie se trouve dans la zone II. Par conséquent nous renonçons à faire une répartition sur les autres zones.

6.2.2. Eau chaude sanitaire

Dans la répartition des consommations pour cet usage thermique, nous n'avons pas tenu compte du secteur industriel. Bien que n'étant pas nulle, la part utilisée pour la préparation d'eau chaude dans ce secteur nous paraît négligeable. Nous nous sommes donc limités au secteur résidentiel et commercial pour lequel nous avons retenu les critères de répartition suivants :

- . nombre de logements comme déjà vu sous 3.2.2.
- . nombre d'habitants par zone soit :

Zone	habitants	%
I	1'200'000	19
II	4'600'000	73
III	500'000	8

6.2.3. Cuisson

Le critère de répartition est uniquement le nombre d'habitants par zone.

6.2.4. Procédés industriels

Nous avons admis que 90% de l'énergie électrique consommée étaient destinés aux procédés industriels alors que pour les autres agents énergétiques cette valeur se réduit à 60% (voir également 6.2.1.).

6.3. Comptabilité exergétique

Les différents éléments étant définis et disponibles, il est possible d'établir la comptabilité exergétique à partir des consommations d'énergie et des facteurs de Carnot à considérer pour chaque zone.

6.3.1. Chauffage des locaux

La température de référence pour le chauffage des locaux est la température moyenne absolue de la période de chauffage de la zone concernée, soit :

Zone	Température moyenne		Fact. Carnot
	°C	K	θ
I	6.0	279.15	0.047
II	4.9	278.05	0.051
III	1.6	274.75	0.063

Un calcul tenant compte de la variation de la température extérieure heure par heure serait théoriquement plus correct mais difficile à réaliser.

6.3.2. Eau chaude sanitaire

L'eau chaude sanitaire étant consommée tout au long de l'année, la température de référence à retenir est la température moyenne annuelle ce qui permet de définir les facteurs de Carnot suivants :

Zone	Température moyenne		Fact. Carnot
	°C	K	θ
I	10.6	283.75	0.122
II	9.3	282.45	0.126
III	4.5	277.65	0.141

6.3.3. Cuisson

Comme pour l'eau sanitaire, les demandes de cuisson s'étendent sur l'ensemble de l'année, d'où les facteurs de Carnot suivants :

Zone	Température moyenne		Fact. Carnot
	°C	K	θ
I	10.6	283.75	0.329
II	9.3	282.45	0.333
III	4.5	277.65	0.344

6.3.4. Procédés industriels

L'industrie étant considérée comme concentrée en zone II, nous n'avons besoin de définir qu'un facteur de Carnot qui sera :

Température moyenne		Fact. Carnot
°C	K	θ
9.3	282.45	0.635

6.3.5. Consommations exergetiques pour les usages autres que thermiques

Afin d'établir un bilan exergetique complet, il faut également considérer la satisfaction des usages d'autres natures qui figurent également au bilan énergétique.

. Usages mécaniques

Conformément à la théorie, le travail mécanique fourni est équivalent à l'exergie.

. Usages chimiques

Dans ce secteur de demandes, l'exergie principalement concernée est l'exergie - transformation. Elle concerne un nombre extrêmement élevé de procédés différents qui nous sont inconnus et pour lesquels les paramètres nécessaires ne sont pas disponibles ou tenus secrets.

Après consultation de nombreux spécialistes, il s'est avéré qu'il était illusoire, pour le moment, de vouloir déterminer, même approximativement, l'exergie et les pertes exergetiques de ce secteur. Nous nous consolons en pensant que moins de 4% des demandes sont ainsi concernées et que de toute façon le facteur de Carnot pour ce genre d'utilisation est élevé, d'où un effet correctif modéré. C'est pourquoi nous admettons que les valeurs du bilan énergétique sont également valables pour le bilan exergetique.

. Lumière

Nous admettons que le rendement exergetique de l'éclairage est égal à son efficacité énergétique. De toute façon, ce n'est pas une erreur même grossière sur ce secteur de consommation qui entraînera une modification du résultat d'ensemble.

6.4. Bilan exergetique

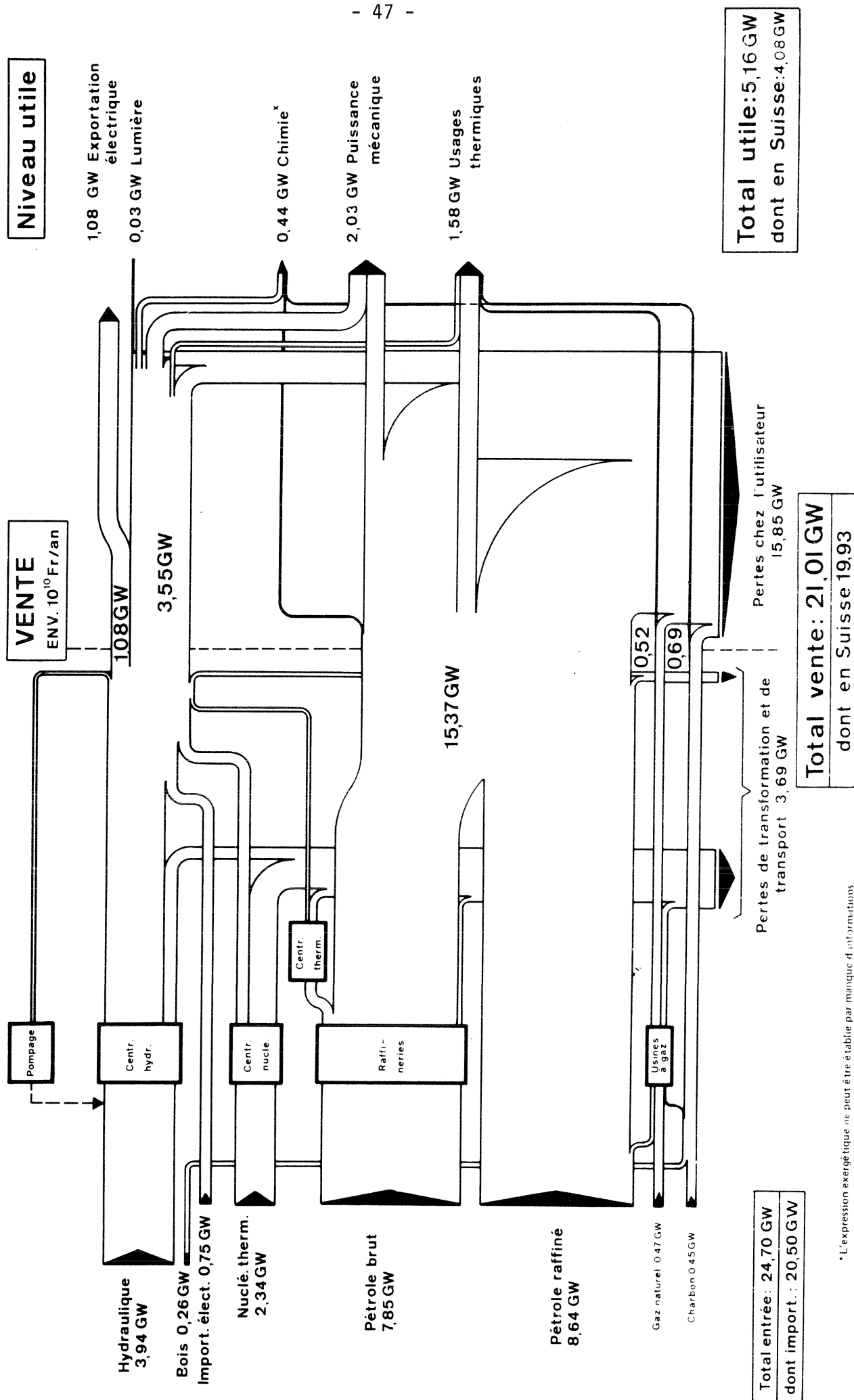
Sans exposer le détail des calculs, nous en donnons le résultat graphiquement sur la figure B5.

Par rapport au bilan énergétique, la différence essentielle se situe au niveau utile et pour les usages thermiques. Le bilan exergetique nous permet d'apprécier à sa juste valeur notre consommation d'énergie (bilan énergétique) par rapport à une consommation théorique minimum correspondant à la nature des demandes (bilan exergetique).

BILAN EXERGETIQUE SUISSE EN PUISSANCE MOYENNE-1974

Niveau primaire

1 GW = 31,5 PJ/an



* L'expression exergetique ne peut être établie par manque d'informations.

Figure B5 : Bilan exergetique

La totalité des usages thermiques correspond en fait à une équivalence mécanique ou électrique de 1.58 GW. En essayant de définir une limite minimum théorique de consommation d'énergie primaire, on admet que toutes les demandes finales d'énergie peuvent être satisfaites par des procédés se rapprochant le plus possible du cycle de Carnot.

En élargissant cette hypothèse et en admettant que le transport et la transformation d'énergies primaires en vecteurs d'énergie ont lieu sans pertes (cas d'une technologie idéale, donc parfaite), la consommation d'énergie primaire deviendrait alors égale à l'exergie utile demandée, ce qui représente bien la limite inférieure extrême de consommation.

A partir de cette limite, toute consommation supplémentaire d'énergie correspond aux pertes exergétiques ou thermodynamiques. Dans le cas du bilan 1974, pour satisfaire une demande d'exergie utile globale d'environ 4 GW il a fallu consommer environ 24 GW, soit 6 fois plus. On constate que pour 1 GW utile on a perdu 5 GW. Cette image est bien différente de celle donnée par le bilan énergétique dans le quel, pour 1 GW utile, la perte qui apparaît n'est que de 1 GW.

La mauvaise gestion de l'énergie, mise en évidence par le bilan exergétique, peut être corrigé de façon sensible par un choix judicieux des vecteurs énergétiques, mieux adaptés qualitativement aux usages finals. Ceci est particulièrement valable dans le cas du chauffage des locaux où le niveau de température requis est spécialement bas. Une technologie appropriée et un vecteur énergétique, voire une chaîne énergétique conformes contribuent à une réduction sensible des pertes exergétiques.

L'application de la comptabilité exergétique permet également de vérifier l'opportunité de mesures ou d'options à prendre et de recommandations à donner. La limite théorique à laquelle se réfère la valeur exergétique permet de mettre en évidence et d'analyser les écarts entre la réalité présente et cette limite, en vue de leur réduction dans le cadre d'une politique d'économies d'énergie.

Cette analyse fait bien ressortir qu'en fait notre demande en énergie est modeste, mais que notre consommation résultant de systèmes conçus en fonction du prix antérieurement bas des produits pétroliers est trop élevée. Cette constatation mérite donc un effort de réflexion et établit l'importance de l'analyse exergétique pour la recherche des domaines où les résultats d'économie d'énergie seront les plus profitables. Sans mettre en cause l'opportunité de nos demandes en énergie, il s'agit d'obtenir le même résultat en engageant des coûts énergétiques moindres.

7. RAPPORTS ANNEXES ET PUBLICATIONS

- [1] Prof. J.-J. MORF, P.-A. BERTHOUD et J.-Chs. CARDINAUX : Bilan énergétique et exergétique de la Suisse, 1974.
- [2] Prof. J.-J. MORF et M. Roux : Situation énergétique de la Suisse en 1976.
- [3] M. AGUET et Prof. J.-J. MORF : Energie électrique.
- 3a P.-A. BERTHOUD et J.-Chs CARDINAUX : Bilan exergétique de la Suisse. 1977

8. REFERENCES

- [4] J.-J. MORF et M. ROUX : Situation énergétique de la Suisse. Bulletin ASE/UCS N° 21a, 1976.
- [5] HOHL (GEK) : Energie-Einsatz in der Schweiz. Rapport interne, 1975.
- [6] L. BOREL : Fonctions d'état, bilan de travail, pertes et rendements thermodynamiques. Bulletin Technique de la Suisse Romande N°s 19 et 20, 1965.
- [7] L. BOREL : Théorie générale de l'exergie et applications pratiques. Revue ENTROPIE. N°s 85 - 86 et 87. Editions Bartheye et Cie, 75008 Paris, 1979.
- [8] L. BOREL : Economie énergétique et exergie. EPF-L - Institut de Thermodynamique. Lausanne, 1974.
- [9] R. MORISOD et L. BOREL : Application de la comptabilité exergétique au problème du chauffage à distance en Suisse. Publications de la Commission fédérale de la conception globale de l'énergie. Etude N° 3. Berne, 1976.
- [10] Recensement fédéral de la population 1970. Tableau 1.53. Banque de données, Département de Mathématiques, EPF-L.
- [11] Recommandations SIA N° 180. Edition 1970.
- [12] Annales de l'Office Météorologique suisse. 1974.
- [13] G.M. REISTAD : Conversion et utilisation de l'exergie aux Etats-Unis. Dept. of mechanical and metallurgical engineering. Oregon State University.

- [14] Energieverbrauch in schweizerischen Industriebetrieben Verein industrieller Brennstoffverbraucher. Juni 1976.
- [15] ZORAN RANT : Exergie und Anergie. Zeitschrift der technischen Hochschule Dresden 13/1964, p. 1145-1149.
- [16] IREC - Institut de Recherche sur l'Environnement Construit, EPF-L : Evaluation du chauffage solaire - P.E. ENERGIE. Analyse statistique 1. 1977.
- [17] L. BOREL et G. YANNI : Aspect thermodynamique du remplacement du chauffage individuel par d'autres modes de chauffage. EPF-L - Institut de Thermodynamique. Lausanne, 1977.

C. ENVIRONNEMENT

1. OBJECTIFS ET MOYENS MIS EN OEUVRE

L'objectif du volet ENVIRONNEMENT du P.E. ENERGIE est de permettre la prise en considération des effets sur l'environnement dans l'évaluation des scénarios énergétiques.

L'approvisionnement de la Suisse en énergie primaire dépend pour plus de 75% d'importations constituées surtout de pétrole brut et de produits pétroliers. Cette énergie importée provient pour la plus grande partie de ressources non renouvelables dont certaines diminuent à un rythme inquiétant.

Il est donc urgent de faire face à cette situation en prenant des mesures qui permettent de :

- . diminuer la demande d'énergie utile
- . améliorer le rendement de la transformation d'énergie primaire en énergie utile
- . substituer à des sources d'énergie primaire étrangères et non renouvelables des sources indigènes et renouvelables.

L'amélioration des rendements et la substitution peuvent être réalisées par des modifications avant tout techniques, mais dont la mise en oeuvre est soumise à priori à des contraintes économiques. La modélisation du système énergétique suisse, au moyen du modèle RETINE, répond à ces préoccupations et permet de déterminer la structure, le coût et l'efficacité de scénarios énergétiques dont le but est d'améliorer les rendements énergétiques par des modifications techniques. La diminution de la demande d'énergie utile, qui dépend surtout de facteurs économiques, sociaux et politiques, et la substitution peuvent être introduites dans les scénarios sous forme de contraintes externes.

La tâche du volet ENVIRONNEMENT était donc de compléter cette modélisation des scénarios par une analyse de leurs effets sur l'environnement, analyse dont les résultats doivent compter parmi les critères d'évaluation de ces scénarios et doivent permettre de proposer une amélioration sélective des secteurs du réseau énergétique les plus dommageables à l'environnement.

La démarche poursuivie par le volet ENVIRONNEMENT s'intègre aux travaux des autres volets. En particulier, les autres volets fournissent au volet

ENVIRONNEMENT les données caractéristiques d'émission et de consommation de ressources des scénarios soumis à l'étude ; de même, les résultats de l'analyse des effets sur l'environnement obtenus par le volet ENVIRONNEMENT sont transmis aux autres volets pour être utilisés dans la création, la modification et la comparaison de scénarios.

Pour atteindre son objectif, le volet ENVIRONNEMENT s'est attaché d'une part à décrire, et si possible quantifier, les effets potentiels et réels que le système énergétique suisse fait peser sur l'environnement, et d'autre part à créer l'outil qui permet d'appliquer cette connaissance à l'analyse et la modification de scénarios énergétiques.

2. RECHERCHES

2.1. Perspectives générales

Les recherches du volet ENVIRONNEMENT ont donc suivi trois voies :

- . la préparation d'"Etudes d'effets", où les effets sur l'environnement dans le secteur de l'énergie sont décrits et évalués selon les critères définis par le volet.
- . le développement d'un outil d'analyse des scénarios énergétiques qui a conduit à la "méthode AMIEE" (Analyse Multidimensionnelle de l'Interaction Energie - Environnement (Réf. 28)).
- . la préparation d'études annexes, concernant par exemple, l'analyse multidimensionnelle, ou les normes de protection de l'environnement dans le secteur de l'énergie.

L'"environnement" et les "effets" qu'il subit sont des concepts qui ne sont ni évidents ni définis d'une manière claire et universellement acceptée. Le volet a donc dû élaborer les définitions qui servent de cadre à son travail. Celles-ci n'ont pas pu être fixées définitivement au départ, les connaissances nouvelles remettant souvent en question les anciennes.

L'environnement a été subdivisé en "récepteurs", qui sont des entités que l'on estime menacées et dignes d'être protégées. Ces récepteurs doivent posséder les qualités suivantes :

- . ils doivent représenter une partie homogène de l'environnement, et posséder une unité fonctionnelle ou spatiale qui permette de les identifier facilement.

- . ils doivent permettre de définir, de mesurer (ou d'estimer) et d'exprimer facilement les effets subis, ceci sous une forme compatible d'un récepteur à l'autre.
- . la subdivision de l'environnement en récepteurs ne doit comporter, si possible, ni vides, ni recouvrements.

Les récepteurs suivants ont été définis :

- . SANTE HUMAINE
 - . HABITAT HUMAIN
 - . FORET
 - . AGRICULTURE
 - . EAUX
 - . AUTRES
 - . CLIMATS
- } ECOSYSTEMES

Les émissions sont à l'origine des effets sur l'environnement. Le terme "émission" est pris ici dans une acception plus large qu'à l'accoutumée. Il comprend non seulement les émissions de polluants chimiques, comme par exemple le SO_2 , mais toutes les causes identifiées d'effets telles que bruit, radiation, épandage de produit pétrolier, et même occupation d'espace et autres causes d'effets sur le paysage. Une vingtaine d'émissions différentes ont été retenues, cette liste n'étant ni exhaustive ni irréfutable.

Les études d'effets, présentées sous 2.2., analysent les effets et établissent, lorsque c'est approprié et possible, une relation entre les émissions et les effets.

Une "émission" a souvent pour première conséquence une "immission", qui est la concentration ou intensité de l'agent nocif émis auquel les récepteurs sont soumis. Les influences de cette immission sur les récepteurs sont les "effets". Une relation entre émission et effets comprend donc deux parties. La première, la relation entre émission et immission, est déterminée de préférence au moyen de cadastres d'émissions et de modèles de dispersion, ou de relevés d'immissions ; ces longues et coûteuses études n'ont été que rarement réalisées, et leur exécution sort du cadre du P.E. ENERGIE. Le volet a donc généralement postulé des relations très simples, principalement proportionnelles, entre émissions et immissions. La seconde, la relation entre immission et effets, est déterminée sur la base d'études de laboratoire (par exemple études toxicologiques) ou d'études dans le terrain (par exemple études épidémiologiques).

En vue d'obtenir une base de comparaison pour les analyses de scénarios, les flux d'émission dans le secteur de l'énergie ont été calculés ou estimés pour les émissions choisies, ceci pour l'année de référence 1974. Pour fixer la part de responsabilité du secteur énergie dans les effets sur l'environnement, les flux globaux d'émission ont été également estimés lorsque la contribution d'autres secteurs était significative.

Afin de rendre comparables les résultats des différentes études d'effets, on a fait appel à la notion de "gravité" des effets. Cette dernière est exprimée par des index de gravité établis sur une échelle allant de 0 (pas d'atteinte) à 5 (destruction du récepteur). Des barèmes permettent de définir les différents niveaux de gravité sur la base de symptômes d'effets.

Dans le domaine du paysage, il fut nécessaire de définir de nouveaux concepts permettant un traitement systématique des effets et de leurs causes. Le paysage lui-même est compris dans un sens très large, qui englobe, outre sa valeur esthétique habituelle, ses aspects fonctionnel et socioéconomique. Les émissions ont été systématisées en fonction des technologies du secteur énergétique, et les effets en fonction des différentes catégories de paysage.

Après avoir appliqué les résultats des études d'effets au spectre des émissions fourni par le modèle RETINE (RETINE calcule les flux totaux d'émission de certains polluants par les scénarios énergétiques), on dispose alors d'une grande quantité d'analyses d'effets mutuellement irréductibles dont on ne peut sans autre tirer une appréciation globale. Il est alors pratiquement impossible de choisir parmi plusieurs scénarios celui que l'on juge préférable pour l'environnement, sauf dans des cas triviaux.

A l'analyse des effets, il faut donc ajouter une méthode d'évaluation qui permette de condenser les effets sous une forme compréhensible. On parle de réduction de l'information. Les premières étapes de la réduction présentent des difficultés techniques ; il faut combiner des effets semblables et commensurables, bien que parfois difficiles à évaluer. Les étapes suivantes demandent en plus que l'on combine des effets de nature dissemblable : par exemple les effets sur la forêt et les effets sur la santé humaine. Des choix subjectifs sont requis pour pondérer ces différents termes. Chaque combinaison entraîne une perte d'information. Le processus de réduction navigue donc entre les deux écueils suivants : si la réduction est insuffisante, le résultat est incompréhensible parce que trop compliqué, mais si la réduction est trop poussée, l'information est escamotée et le résultat est principalement l'expression de nombreux choix plus ou moins apparents.

La première méthode d'évaluation employée par le volet ENVIRONNEMENT était basée sur la notion de "Fonction de dégradation". Les effets sur l'environnement y sont exprimés sous forme de grandeurs monétaires, les coûts de dommage. Ces coûts sont ensuite traduits en termes d'énergie à soustraire de l'énergie utile fournie par la stratégie énergétique. Après un développement initial prometteur, il s'est avéré que certains coûts de dommage ne pouvaient pas être déterminés de manière satisfaisante dans l'état actuel des connaissances relatives aux effets de la pollution, ou avec les moyens à disposition dans le cadre du P.E. ENERGIE.

La nouvelle méthode d'évaluation a été nommée AMIEE, ce qui signifie "Analyse Multidimensionnelle de l'Interaction Energie Environnement". Les principes directeurs d'AMIEE sont les suivants :

- . toutes les formes d'effets sur l'environnement doivent pouvoir être considérées, même si elles ne se prêtent pas à une quantification rigoureuse.
- . les différents effets sur l'environnement sont considérés séparément, ceci dans la mesure du possible (analyse multidimensionnelle).
- . toute réduction de la dimension de l'analyse est explicite (transparence du processus de réduction).
- . la méthode est accessible aux non spécialistes. Son objet est d'éclairer des décisions dont les effets touchent la collectivité. Elle doit donc pouvoir utiliser des critères de choix reflétant une volonté politique ou un consensus populaire.

La méthode AMIEE est basée sur les concepts d'émission et de récepteur. Les effets sur les récepteurs dus aux émissions sont évalués par les index de gravité déjà mentionnés. AMIEE n'est qu'un élément de l'ensemble du modèle de système énergétique, développé par le P.E. ENERGIE et doit fonctionner conjointement avec le modèle RETINE et la banque de données CARTEN. La structure du modèle complet est expliquée sous 2.3.2.. Le fonctionnement de ce modèle a été vérifié par des tests d'application décrits sous 4.

Les études et travaux annexes du volet ENVIRONNEMENT ont porté sur les sujets suivants :

- . les technologies et les coûts de diminution (réduction des émissions) dans le domaine de l'automobile
- . les normes de protection de l'environnement dans le domaine de l'énergie
- . le calcul et la vérification des facteurs d'émission répertoriés dans la banque de données CARTEN.

2.2. Etudes d'effets

Chaque effet sur l'environnement est causé par une ou plusieurs émissions. Ainsi, la notion d'émission doit être comprise dans un sens élargi : émission de matières dans l'air et dans l'eau, émission de radiations, de chaleur, de bruit, mais aussi accidents, épuisement des ressources, occupation d'espace... Qu'un massif forestier soit rongé par l'anhydride sulfureux ou noyé sous l'eau d'un barrage aboutit au même résultat : sa disparition. Dans les deux cas, on trouve la cause dans une émission, qui est le SO_2 dans le premier ou le barrage d'accumulation dans le second.

La méthode AMIEE a été créée pour évaluer la gravité des effets des émissions sur l'environnement. C'est dans ce but qu'une étude d'effets a été réalisée pour chaque émission. Ces études d'effets peuvent être classées en cinq catégories, selon la nature de l'émission :

- . les émissions chimiques ou physiques dans l'air et dans l'eau (2.2.1.)
- . les émissions affectant le paysage (2.2.2.)
- . les émissions de bruit des sources mobiles (2.2.3.)
- . les accidents (2.2.4.)
- . l'épuisement des ressources (2.2.5.).

Nous avons vu sous 2.1. qu'il existe en général une "relation émission-immission" entre une émission considérée (quantité) et l'immission qui en résulte (concentration ou intensité). Il existe également une relation entre une immission et les effets qui en découlent. Ces derniers sont caractérisés par la notion de "gravité partielle". La relation "immission - gravité partielle" est appelée "fonction - critère".

Chaque effet est décrit par un certain nombre de caractéristiques dont les plus fréquemment utilisées sont la TOXICITE, la DUREE et l'ETENDUE.

Chaque gravité partielle est évaluée par un "index de gravité partielle g_i " choisi dans un barème allant de 0 à 5, conformément au tableau de la figure C1.

g _i	TOXICITE	DUREE	ETENDUE
1	seuil de perception	rare et irrégulier	ponctuel ; ~ 1 km ² ; quelques dizaines de personnes
2	premiers symptômes extérieurs	rare mais régulier	local ; 1 - 20 km ² ; quelques centaines de personnes
3	effets graves mais réversibles	semi-périodique	petite région ; 20 - 500 km ² ; moins de 50 000 personnes
4	effets graves et irréversibles	périodique	région, canton ; 500 - 10 000 km ² ; moins d'un million de personnes
5	mort, destruction totale	permanent	au moins une subdivision majeure du pays : Alpes, préalpes, plateau ; plus de 10 000 km ² ; plus d'un million de personnes

Figure C1 : Barème de gravités partielles

2.2.1. Emissions chimiques ou physiques dans l'air et dans l'eau (Réf. 5 à 10, 17, 20, 27)

C'est cette catégorie qui a donné lieu au plus grand nombre d'études, ceci en général et non seulement dans le cadre du P.E. ENERGIE.

Douze émissions sont prises en considération :

. Neuf émissions dans l'air :

Particules en suspension. Anhydride sulfureux. Oxydes d'Azotes. Hydrocarbures et oxydants photochimiques. Monoxyde de Carbone. Dioxyde de Carbone*. Plomb. Radionuclides*. Chaleur*.

. Trois émissions dans l'eau :

Chaleur. Hydrocarbures*. Radionuclides*.

Les cinq émissions affectées d'un * n'ont pas fait l'objet d'une étude détaillée, mais ont été traitées dans une étude commune (Compléments d'études d'effets, Réf. 32). Les sept autres émissions sont traitées chacune dans un rapport séparé, dont l'importance est variable, à cause du sujet d'abord, mais aussi par le nombre d'informations qu'il contient. Cependant, on y retrouve grosso modo la même structure en trois parties fondamentales : caractéristiques d'émission et d'immission, description des effets et barème de gravité.

Les caractéristiques suivantes d'émission et d'immission sont prises en considération :

- . formes et origines, lieu et étendue, fréquence et durée des émissions, naturelles ou anthropogéniques.
- . formes, lieu et étendue, fréquence et durée, transports transfrontières des immissions observées, en Suisse et éventuellement à l'étranger.
- . normes d'émission et d'immission existantes pour la Suisse et pour d'autres pays.
- . relation émission - immission, dans le but de prévoir les effets des émissions totales relatives à un scénario énergétique. A défaut d'une relation connue, elle est supposée linéaire, le coefficient de proportionnalité étant calculé pour l'année de référence 1974 ou 1975.

Sur la base des observations expérimentales et épidémiologiques tirées de la littérature, les effets sur chaque récepteur sont décrits. Etant donné que les récepteurs autres que SANTE HUMAINE ont été redéfinis, alors que la plupart des études d'effets étaient terminées, la description de leurs effets et leur barème de gravité figurent dans les compléments d'études d'effets (Réf. 32).

On considère en priorité les effets à long terme. Les effets aigus, à court terme (en général connus par voie expérimentale ou accidentelle) y sont également traités, mais surtout pour étayer ou élargir les connaissances épidémiologiques existantes, qui sont souvent fragmentaires.

Pour les émissions chimiques ou physiques dans l'air ou dans l'eau, les caractéristiques d'effet considérées sont les suivantes :

- TOXICITE . changement enzymatiques
 - . effets pathologiques
 - . gêne de l'exploitation
 - . altération des fonctions de la nature
 - . influence visuelle

DUREE . durée de l'immission
ETENDUE . fraction du récepteur atteint

2.2.2. Emissions affectant le paysage (Réf. 13, 18, 22, 23, 26, 29)

Le paysage est un milieu physique dans lequel s'intègrent une certaine flore et une certaine faune et qui est façonné par l'homme en fonction de ses besoins socio-économiques.

La prise en compte des effets sur le paysage n'est pas, comme on le voit quelquefois, une question d'esthétique seule. Le paysage se présente comme un ensemble d'éléments naturels (végétation, eau, rochers, etc...) plus ou moins organisés par l'homme et auquel se superpose un tissu de relations invisibles qui lui permet de fonctionner (échanges de matière et d'énergie).

Analyser les effets sur le paysage consiste donc à définir les modifications de son fonctionnement aussi bien que de son aspect. Dans un pays où une très grande partie du territoire est utilisée, un aménagement nouveau ne se fera pas sans influencer sur l'utilisation préexistante du sol. En d'autres termes, les effets sur le paysage doivent être analysés dans trois secteurs :

- . l'utilisation du sol
- . les fonctions
- . la physionomie.

Comme tout être vivant, et en particulier comme l'homme, le paysage est un intégrateur. Les effets de différentes provenances et de différentes natures provoquent sur un organisme des dégradations d'ensemble qu'il conviendrait de décrire globalement pour connaître son état de santé. De même le paysage intègre toutes les modifications qu'on lui fait subir et présente finalement une physionomie et un état de fonctionnement qui changent au cours du temps.

Contrairement à d'autres domaines, comme celui de la pollution par des substances chimiques ou par le bruit, il est difficile de définir les émissions provoquant des effets sur le paysage. Pour définir ces émissions d'une manière compatible avec la méthode AMIEE, nous avons commencé par analyser les effets sur le paysage de trois technologies très différentes et nous en avons déduit quelques modes d'action qu'il est possible de considérer comme des émissions. Les technologies étudiées à ce jour sont :

- . les aménagements hydroélectriques à accumulation
- . les raffineries
- . les pipelines.

Pour le domaine du paysage, l'analyse à partir des technologies est inévitable puisque les émissions sont identiques à la technologie elle-même, et non pas dégagées par cette dernière comme le serait un polluant.

Les trois émissions suivantes sont assez bien définies pour qu'on puisse les évaluer :

- . Occupation d'espace : c'est l'émission qui exprime l'affectation d'une portion d'un récepteur à une nouvelle utilisation.
- . Coupure : c'est l'émission qui provoque une solution de continuité au sein d'un récepteur ou entre deux récepteurs, dont les effets sont un obstacle aux relations visuelles, fonctionnelles ou sociales existantes.
- . Présence : c'est l'émission qui correspond au fait qu'une technologie se manifeste plus ou moins à nos yeux. Le côté qualitatif de cette présence (plus ou moins grande discrétion) doit être pris en compte par ailleurs.

Telles sont les trois émissions qui ont pu être suffisamment précisées jusqu'ici. On peut les quantifier au moyen d'unités appropriées. Si ce sont les seules que nous prenons en compte pour le moment, cela ne signifie pas que l'inventaire des émissions affectant le paysage soit ainsi terminé.

Pour les émissions affectant le paysage, les caractéristiques d'effets considérées sont les suivantes :

- TOXICITE . gêne de l'exploitation
- . altération des fonctions
- . dénaturation
- . influence visuelle
- DUREE . durée
- . réversibilité
- ETENDUE . extension géographique
- . densité

2.2.3. Emissions de bruit des sources mobiles (Réf. 21)

Les sources de bruit peuvent être classées suivant leur caractère mobile ou fixe. Dans le secteur énergétique, les sources mobiles ont des effets beaucoup plus graves que les sources fixes. Compte tenu des moyens à disposition dans le cadre du P.E. ENERGIE, il a été décidé d'analyser exclusivement les effets des trois principales sources mobiles : le trafic routier, le trafic ferroviaire et le trafic aérien.

La grandeur déterminante pour la valeur instantanée d'un bruit est le niveau de pression acoustique L_A . Elle est exprimée en décibels (A), en

abrégé dB(A). La valeur moyenne de L_A est le niveau équivalent L_{eq} , obtenu par intégration de L_A dans le temps. Elle est également exprimée en dB(A).

En prenant comme étalon l'émission standard de bruit d'une voiture de tourisme, il est possible de définir l'échelle des Equivalent - Véhicule - Bruit (EVB). Cette échelle permet l'aggrégation des émissions des différentes technologies de transport. Ainsi, l'émission d'une technologie de transport, comme par exemple le vélomoteur ou le camion, s'exprime par le nombre de voitures de tourisme émettant le même bruit, chacun des bruits étant considéré à sa source.

Le calcul de l'exposition de la population au bruit du trafic routier est basée sur les travaux de la CGST (Conception Globale Suisse des Transports). Ces travaux ont permis d'établir des courbes d'exposition, telles que celles de la figure C2, représentant un pourcentage de la population exposée au bruit en fonction du niveau équivalent L_{eq} .

Ces courbes indiquent le pourcentage de la population exposée à un niveau de bruit égal ou supérieur à la valeur L_{eq} considérée comme immission.

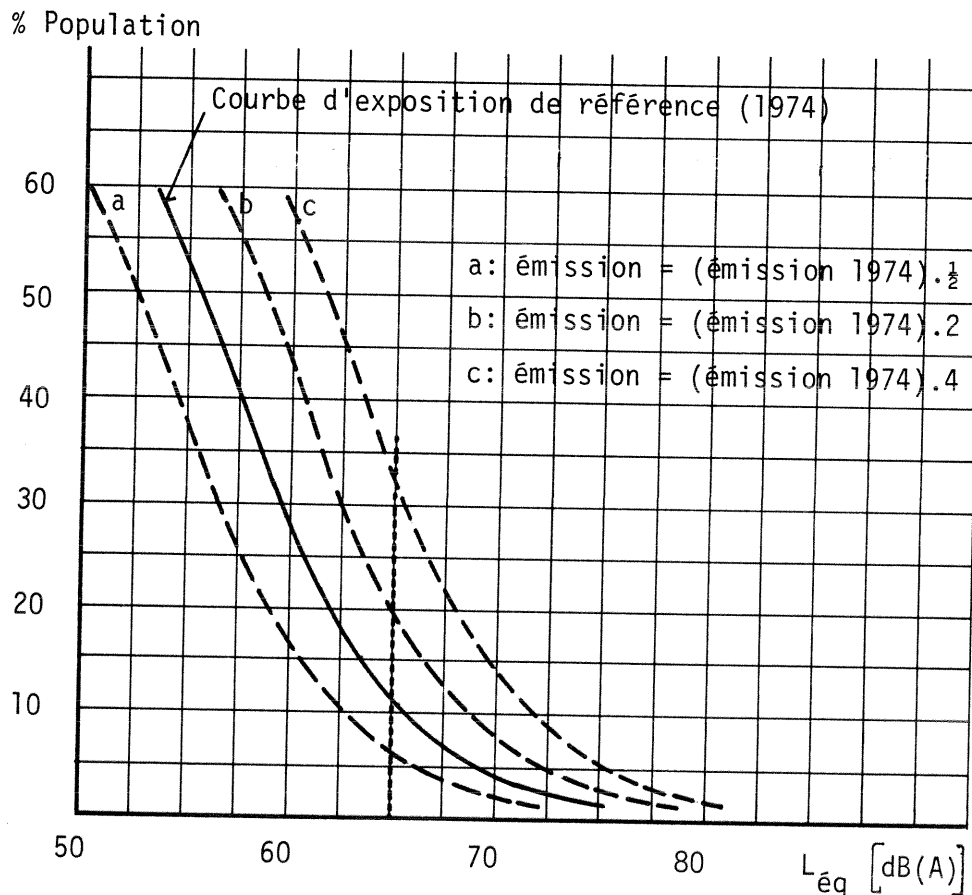


Figure C2 : Courbes d'exposition au bruit de la population suisse, pour différentes émissions.

Pour un scénario énergétique quelconque, il suffit, compte tenu des hypothèses précédentes, de considérer la variation de l'émission totale, exprimée en EVB, par rapport à celle de l'année de référence 1974. On en déduit la courbe d'exposition correspondante, qui, en général, sera différente de celle relative à l'année 1974.

Les effets du bruit sur le récepteur SANTE HUMAINE ne sont pas comparables à ceux des polluants chimiques. Alors que dans le second cas on constate l'apparition de symptômes pathologiques plus ou moins graves chez un nombre restreint de personnes, dans le premier cas on ne constate qu'une gêne, certes quelquefois importante, touchant un nombre très élevé de personnes. Comme il est difficile d'évaluer la gravité de la gêne, notion éminemment subjective, nous avons décidé de fonder l'évaluation de la gravité exclusivement sur le pourcentage de la population soumise à un niveau sonore équivalent (L_{eq}) supérieur à 65 dB(A). Cette valeur est généralement considérée comme le maximum admissible.

Les effets du bruit sur le récepteur HABITAT HUMAIN sont évalués en tenant compte de la perturbation des relations sociales à l'intérieur des communautés (famille, quartier, village) due au bruit.

Pour les émissions de bruit, les caractéristiques d'effets considérées sont les suivantes :

TOXICITE . gêne pour l'habitat

ETENDUE . pourcentage de la population gênée

2.2.4. Epuisement des ressources énergétiques (Réf. 25)

L'essentiel de l'énergie que nous consommons provient de ressources finies d'énergie non renouvelables : charbon, pétrole, gaz, uranium. Tout devrait être mis en oeuvre à l'avenir pour diminuer la consommation de telles ressources, ceci en faisant appel aux énergies renouvelables. Pour la consommation des ressources énergétiques, la caractéristique d'effet considérée est l'EPUISEMENT.

L'outil que nous avons développé s'appuie sur les estimations actuelles des réserves en combustibles fossiles et en uranium dont dispose l'humanité. Il est clair que la consommation suisse est très faible par rapport à la consommation mondiale. C'est pourquoi nous avons introduit la notion de consommation mondiale équivalente à celle de la Suisse, définie comme étant la consommation mondiale dans l'hypothèse où tous les habitants de la planète consommeraient en moyenne la même énergie qu'un habitant de la Suisse.

Connaissant le stock S_0 d'un combustible non renouvelable, la consommation mondiale équivalente C_0 dans l'année considérée et le taux de croissance k de cette consommation, le temps d'épuisement en années de la ressource est :

$$t_e \approx \frac{1}{k} \ln \left(1 + \frac{S_0}{C_0} k \right)$$

Il est bien entendu qu'en cas de décroissance, la valeur de k est négative. A partir de là, nous définissons la gravité g de l'épuisement de la ressource :

$$g = 5 e^{-\frac{t_e}{t_0}}$$

Le temps t_0 est un nombre d'années de références. C'est la durée limite estimée comme tolérable, permettant d'effectuer les substitutions énergétiques souhaitables avant l'épuisement total de la ressource.

La valeur de g tend vers 0 si la ressource est quasi inépuisable à l'échelle de temps de notre civilisation industrielle et tend vers 5 si la ressource est épuisée très rapidement.

Pour les ressources renouvelables, l'index de gravité est égal à zéro lorsque la consommation moyenne annuelle est inférieure ou égale à l'apport moyen annuel. C'est le cas des énergies que nous pouvons capter sous forme de flux continu (énergies hydraulique, solaire, géothermique, éolienne).

Dans le cas où l'énergie renouvelable est stockée par voie naturelle à un rythme perceptible à l'échelle humaine (bois, biomasse), il est possible que la consommation moyenne annuelle soit supérieure à l'apport moyen annuel. On peut alors calculer le temps d'épuisement t_e du stock en résolvant l'équation implicite :

$$t_e = \frac{1}{k} \ln \left(1 + \frac{S_0 k}{C_0} + \frac{Rk}{C_0} t_e \right)$$

dans laquelle R est le renouvellement moyen annuel de la ressource.

L'index de gravité est alors supérieur à zéro,

On définit aussi un "indice de durée" ρ de la ressource, qui est lié à la gravité g de l'épuisement de la ressource par la relation :

$$\rho = 1 - \frac{g}{5} = 1 - e^{-\frac{t_e}{t_0}}$$

2.2.5. Risques d'accidents (Réf. 24)

Les activités liées à la consommation d'énergie, de l'extraction d'un combustible à la génération d'électricité en passant par le transport et le stockage d'agents énergétiques, sont à l'origine d'accidents, à l'instar de toute activité humaine.

Nous avons fait la distinction entre deux grandes catégories d'accidents : les accidents de routine et les catastrophes.

. Les accidents de routine ont lieu à tous les stades d'une chaîne énergétique. On peut prendre des mesures pour limiter ou diminuer ces accidents, mais on ne peut pas les éliminer ; les statistiques en attestent.

Pour les chaînes énergétiques partant du charbon, du pétrole, du gaz et de l'uranium, nous avons obtenu des chiffres donnant le nombre de morts et blessés en une année, rapportés à une énergie primaire unitaire de 1 MWan.

La grandeur utilisée pour les comparaisons est exprimée en jours-hommes perdus / MWan : elle tient compte des journées de travail perdues suite à des blessures ou à des décès parmi les travailleurs professionnels et parmi le public. Un décès correspond à 6000 jours-hommes perdus en moyenne. En ce qui concerne les énergies renouvelables, des statistiques valables n'existent que pour le bois. Pour l'énergie solaire et l'énergie éolienne, nous avons utilisé avec certaines réserves les estimations d'Inhaber publiées par l'Atomic Energy Control Board du Canada.

Nous sommes donc en mesure d'estimer le nombre total de jours-hommes perdus, en dehors et à l'intérieur de nos frontières, dus à notre consommation d'énergie primaire.

Pour juger de la gravité des effets sur la santé humaine, provoqués par ces accidents dans le secteur énergétique, nous avons établi un parallèle avec les accidents de la circulation. Pour 1974, les nombres de jours-hommes perdus sont respectivement de 10^6 pour l'énergie et 10^7 pour la circulation. Les effets des accidents liés à la consommation d'énergie sont donc moins graves que les effets des accidents de la route. L'échelle proposée est logarithmique ; elle postule l'index de gravité maximum lorsque 20% ou plus des journées de travail totalisées par la population active sont perdues suite à des accidents.

- . Les catastrophes (accidents à grande échelle) sont des événements susceptibles de se produire exceptionnellement. Cette catégorie concerne essentiellement les barrages hydroélectriques à accumulation et les centrales nucléaires. Ici, l'analyse doit se baser sur la notion de risque, ce dernier étant défini comme le produit de la probabilité d'accident par les effets qui en résultent :

$$\text{risque} = \text{probabilité d'accident} \times \text{effets}$$

Dans le cas des barrages hydroélectriques, les catastrophes ayant eu lieu dans le monde au cours des dernières décennies permettent une évaluation du risque que présentent les barrages suisses dont la rupture provoquerait une catastrophe.

Dans le cas des centrales nucléaires, la probabilité d'accident et les effets possibles ne sont pas vraiment connus, aucune catastrophe n'ayant à notre connaissance eu lieu jusqu'à présent. Nous devons donc nous contenter des estimations consignées dans divers rapports scientifiques, dont le plus connu est celui de l'équipe Rasmussen. Malheureusement, non seulement ces estimations ne concordent pas mais les méthodologies employées sont très controversées. Il faut relever que si la probabilité d'une catastrophe est extrêmement faible, en revanche les effets qui en résulteraient sont considérables. A la limite, le risque serait le produit d'une quantité tendant vers zéro et d'une quantité tendant vers l'infini. Comme on le sait, un tel produit est indéterminé, de sorte que la notion de risque perd alors toute signification.

Pour les accidents, les caractéristiques d'effets considérées sont les suivantes :

ACCIDENTS DE ROUTINE nombre de jours-hommes perdus à cause des accidents de routine.

CATASTROPHES les accidents potentiels à grande échelle, eux-mêmes caractérisés par :

- . la probabilité
- . le nombre de décès
- . l'étendue
- . le degré d'ignorance des effets.

2.3. Méthodes d'évaluation

On ne peut mieux exprimer la difficulté d'évaluer les effets sur l'environnement que ne l'a fait l'économiste E.F. Schumacher :

"Il est certes vrai que le qualitatif est beaucoup plus difficile à "manier" que le quantitatif, tout comme l'exercice du jugement est une fonction supérieure à l'aptitude à compter et à calculer. On peut saisir les différences quantitatives et certainement les définir plus facilement que les différences qualitatives. Leur caractère concret est trompeur. Il donne l'illusion de la précision scientifique, même quand celle-ci a été acquise au prix de la suppression de différences essentielles de qualité".

2.3.1. Fonction de dégradation

Comme on l'a indiqué sous 2.1., le volet ENVIRONNEMENT a choisi initialement d'analyser les effets sur l'environnement, causés par les scénarios énergétiques, au moyen de la "Fonction de dégradation".

L'évaluation comparative des chaînes de transformation d'énergie serait peu satisfaisante si elle ne comportait pas une analyse traitant des effets qu'elles provoquent. L'identification, la description, la mesure et la prévision de ces effets, par leur très grande diversité, par leur incommensurabilité, ne permet cependant guère de faire des comparaisons directes.

La Fonction de dégradation a été créée comme un outil de synthèse devant permettre en fin de compte d'effectuer des choix. Les effets sur l'environnement y sont exprimés sous forme de grandeurs monétaires, les coûts de dommage. Le coût global de l'énergie est la somme des coûts d'investissement, d'exploitation et de pollution, au stade considéré de la chaîne énergétique.

Pour chaque chaîne énergétique, il est possible de définir le service positif fourni à la société, comme étant la somme des diverses prestations en énergie, telles que électricité, chaleur, froid...

D'autre part, il est possible de définir le service négatif imposé à la société, comme étant la somme des différents coûts de dommage exprimés en énergie. La conversion des coûts en énergie s'effectue à l'aide d'un prix moyen de l'énergie calculé pour la chaîne énergétique considérée.

Pour chaque chaîne énergétique, la somme des services négatifs relatifs à chaque polluant constitue la Fonction de dégradation. Cette dernière

est décrite dans les références 1 à 4. Le service global fourni à la société par la chaîne énergétique est défini comme étant le service positif diminué du service négatif.

Chaque chaîne énergétique peut dès lors être caractérisée par le service global, par le rendement global et par le prix de revient global de l'énergie, ainsi que par les coûts de dommage.

La quantité et la répartition des polluants dans l'environnement entraînent des dommages et des coûts monétaires de dommage qu'il s'agit d'estimer. Un travail préliminaire traitant le cas du SO_2 en Suisse a été publié sous le titre "Elaboration d'une fonction de dégradation, application au cas du SO_2 en Suisse". (Réf. 1)

Pour chaque récepteur (santé humaine, faune, flore, matériaux, climat, ressources naturelles et culturelles), les coûts monétaires de dommage comportent toujours les pertes financières et les pertes d'aménité. Ainsi, pour les effets sur la santé humaine, les pertes financières sont dues aux modifications de la capacité de production, aux soins médicaux (traitement de maladies, investissements en équipements, recherches étiologiques) ainsi qu'aux pertes diverses telles que frais de déménagement ou d'enterrement. Les pertes d'aménité comportent les coûts de l'accroissement de divers risques, les coûts de maladie et de gênes (odeurs, bruits), les coûts de souffrance et de deuil.

La recherche des coûts économiques, en particulier celle des coûts d'aménité, est une tâche hérissée de difficultés, dont les résultats sont inévitablement approximatifs. Cependant, cette recherche ne saurait être évitée, si l'on admet que les chaînes énergétiques doivent être évaluées en fonction du service global qu'elles fournissent, c'est-à-dire comparées en tenant compte des influences négatives qu'elles exercent sur l'environnement.

Comme indiqué plus haut, l'application de la Fonction de dégradation au cas du SO_2 en Suisse (Réf. 1) était une étude préliminaire. Etant donné les connaissances actuelles, les résultats obtenus sont à considérer de manière plus qualitative que quantitative.

Le volet ENVIRONNEMENT tenta d'appliquer la Fonction de dégradation à la pollution par le monoxyde de carbone. Il s'avéra impossible de déterminer les coûts de dommage dans ce cas relativement simple. Le "Rapport sur la détermination pratique du coût des dommages" (Réf. 11) analysa les difficultés rencontrées. Il conclut que seule une partie des coûts réels, dont ne font

pas partie les coûts de dommage, peut être déterminée. Ces coûts réels sont les coûts de diminution (relatifs aux mesures de réduction des émissions) et ceux d'administration (relatifs aux coûts indirects de contrôle de la pollution, par exemple d'établissement et d'application de normes, de recherche sur la protection de l'environnement, etc). Par contre, les coûts de dommage ne peuvent pas être déterminés, pour des raisons pratiques. Ces dernières peuvent se résumer en disant que les dommages physiques ne sont pas connus de manière quantitative, d'une part à cause de l'importance de la tâche, et d'autre part parce que l'on ne peut déterminer la contribution de chaque polluant dans ces dommages. Or, la Fonction de dégradation requiert, du moins sous sa forme actuelle, la connaissance de ces causalités détaillées. L'obstacle principal réside dans le fait que, même si les dommages physiques sont connus ou prévisibles, leur équivalent monétaire est difficile à déterminer. Par exemple, alors que les coûts sociaux de l'hospitalisation, du manque à gagner, etc, sont évaluables, par contre la maladie et la mort ont une dimension de souffrance humaine qui ne pourrait être évaluée en argent que par un consensus dépassant le cadre du P.E. ENERGIE. En conséquence, le volet ENVIRONNEMENT renonça à considérer la Fonction de dégradation comme moyen unique de prise en compte des effets sur l'environnement. Toutefois, il faut dire que cette première méthode a été l'indispensable catalyseur qui a activé la recherche du volet ENVIRONNEMENT.

2.3.2. La méthode AMIEE

La démarche du volet ENVIRONNEMENT était basée, à l'origine, sur l'application d'une méthode d'analyse unidimensionnelle pour l'étude des effets globaux sur l'environnement. Or, la diversité et la non-réductibilité du réel social impose l'utilisation de méthodes d'analyse multidimensionnelle, selon les conclusions de l'étude intitulée "La nécessité et les limites de l'analyse multidimensionnelle dans la planification" (Réf.14)

Bien que ces méthodes ne puissent totalement éviter l'introduction de choix subjectifs, elles mettent ces choix en évidence et permettent un enrichissement de l'analyse. L'étude décrit succinctement certaines de ces méthodes. Dans le cadre de la planification associée aux problèmes énergétiques, le rôle des collaborateurs du P.E. ENERGIE est identifié à celui d'une "équipe technique de planification". Cette équipe doit décrire au mieux des situations passées, présentes ou futures, mais il ne lui appartient pas à elle seule de choisir parmi les différentes options énergétiques possibles.

Ce choix ne peut se faire que d'une manière interactive, en faisant intervenir aussi bien l'équipe technique que les représentants des personnes et des communautés concernées ; les méthodes d'analyse multidimensionnelle constituent des outils de travail à leur disposition.

Conjointement à cette étude de nature générale, plusieurs rapports (Réf. 12, 19, 26) contribuèrent à l'élaboration d'une méthode d'analyse et de synthèse multidimensionnelle adaptée aux besoins du P.E. ENERGIE.

● Description de la méthode AMIEE

La méthode AMIEE (Analyse Multidimensionnelle de l'Interaction Energie-Environnement), est un élément du groupe de modèles permettant de décrire et de modifier des scénarios énergétiques établis au niveau national de la Suisse. Nous appelons scénario énergétique un ensemble de mesures permettant de satisfaire une demande en énergie utile.

Le scénario fixe les règles du jeu, les contraintes qui le définissent. On aura, par exemple, des scénarios nucléaires, solaires, diversifiés, etc, avec des contraintes d'économie, de croissance, de carence pétrolière, etc. Les scénarios sont représentés par un réseau de "technologies" parcouru de flux énergétiques.

Chaque "technologie" représente l'ensemble des installations d'un type particulier permettant, soit de transformer l'énergie, soit de la transporter, soit de la stocker. L'ensemble des raffineries de pétrole est un exemple de technologie, comme l'ensemble des lignes à haute tension, ou celui des automobiles légères à essence, ou celui des citernes à mazout, etc.

Les instruments permettant de décrire le système énergétique comprennent la banque de données CARTEN et le modèle RETINE. Dans CARTEN, les caractéristiques des effets sont consignées. Dans RETINE, les technologies forment un réseau énergétique.

La distribution des flux énergétiques dans le réseau répond à la demande d'énergie utile ; cette distribution permet également de favoriser, par une attribution préférentielle de flux énergétique, les technologies répondant le mieux à un critère de discrimination choisi. Ce critère est exprimé dans le modèle RETINE par une attractivité. Plus une technologie est favorable à l'égard du critère choisi, plus son attractivité est élevée et plus le flux énergétique qui la traverse est important.

La distribution des flux dans le réseau est automatique si l'on choisit, comme critère de discrimination, le rendement énergétique ou exergetique

des technologies, ou encore leur prix de revient. Par contre, cette distribution ne peut être effectuée que plus difficilement si l'on choisit d'autres critères.

La banque de données CARTEN, le modèle RETINE et la notion d'attractivité ont été développés par le volet MODELISATION et sont décrits avec plus de détail dans la partie du rapport concernant ce volet.

Outre les flux du réseau, le programme du modèle RETINE calcule et totalise les coûts d'investissement et d'exploitation ainsi que les émissions de polluants pour toutes les technologies constituant le réseau ; il calcule enfin les rendements énergétique et exergétique globaux relatifs à un scénario.

Les données de coûts, de rendement et d'émissions spécifiques de chaque technologie, requises pour ces calculs, sont fournies par la banque de données CARTEN.

La méthode AMIEE analyse les effets des scénarios sur l'environnement à partir des émissions de polluants calculées par le programme du modèle RETINE. L'application de la méthode AMIEE permet d'obtenir soit une description des effets d'un scénario sur l'environnement, soit une comparaison de plusieurs scénarios.

La méthode AMIEE met également en évidence les caractéristiques des scénarios dans deux autres domaines :

- . l'épuisement des ressources énergétiques,
- . les accidents de routine et les risques d'accidents graves liés à l'existence et à l'usage des technologies.

La méthode AMIEE est donc un instrument permettant ou facilitant :

- . la description des effets sur l'environnement causés par l'application d'un scénario énergétique
- . la sélection, parmi plusieurs scénarios, de celui qui cause les effets sur l'environnement jugés les moins graves
- . la recherche des modifications les plus efficaces à apporter aux scénarios pour réduire leurs effets sur l'environnement.

Le caractère multidimensionnel de la méthode AMIEE signifie que les effets sur l'environnement ne sont pas exprimés sous forme d'un paramètre unique, tels les coûts de dommage. L'analyse révèle plusieurs paramètres, se rapportant, par exemple, aux effets sur l'homme, sur le paysage, sur les eaux, etc.

La simplification du résultat de l'analyse implique un choix subjectif. Une appréciation globale des effets sur l'environnement ne peut être exprimée que si l'on établit une mesure commune à tous les types d'effets frappant tous les récepteurs, en se gardant toutefois d'affirmer qu'il y ait identité ou équivalence absolue.

C'est ici qu'intervient le partenaire de l'équipe technique : c'est le représentant des personnes et des communautés concernées, que nous appelons "utilisateur". Dans le travail de recherche et de développement, le personnel du P.E. ENERGIE joue bien entendu le double rôle d'équipe technique et d'utilisateur.

L'utilisateur, en comparant différents scénarios, devra, par exemple, englober dans le même critère d'appréciation les effets sur la santé humaine et sur l'occupation de territoire par des lacs d'accumulation.

En règle générale, plus on simplifie le résultat de l'analyse, plus on doit introduire de choix subjectifs. On ne peut donc éviter un compromis entre la simplicité du résultat et son objectivité.

La méthode AMIEE est conçue de manière à montrer les choix subjectifs que contient l'analyse (la transparence) et à permettre à l'utilisateur d'y introduire facilement ses propres choix (l'accessibilité).

Bien que la suite du rapport décrive l'application pratique de la méthode AMIEE et comporte donc des choix déjà faits, il faut se souvenir qu'il s'agit là d'une démonstration et que beaucoup de données pourront et devront être modifiées suivant les besoins et les choix propres de l'utilisateur.

La méthode AMIEE part du mesurable et de l'objectif et fait intervenir des opérations de plus en plus qualitatives et subjectives dont le but est de réduire le nombre d'index exprimant le résultat de l'analyse. Ce nombre d'index est appelé "dimension" de l'analyse. Par exemple, si le résultat final de l'analyse s'exprime par six index, on parlera d'analyse de dimension six.

● Utilisation de la méthode AMIEE

La figure C3 représente l'organigramme de la méthode AMIEE dans le cadre de la modélisation. Les chiffres 1 à 6 indiquent les actions et les résultats intermédiaires qui précèdent le recours à la méthode AMIEE.

L'un des instruments les plus importants de la méthode AMIEE est la "matrice des effets émission-récepteur", qui intervient sous chiffre 9. Cette matrice des effets est illustrée par la figure C4.

Chaque ligne de la matrice correspond à une émission et chaque colonne à un récepteur.

A chaque intersection d'une ligne et d'une colonne de la matrice, on introduit un nombre appelé index de gravité, qui traduit la gravité de l'effet de l'émission sur le récepteur.

La figure C5 donne un exemple de détermination d'un index de gravité :

- . La description des effets s'effectue au moyen de caractéristiques d'effets, comme on l'a vu sous 2.2. Dans le cas présent, qui est le plus courant, les caractéristiques considérées sont la TOXICITE, la DUREE et l'ETENDUE.
- . En ce qui concerne la TOXICITE, le modèle RETINE fournit l'émission totale relative au scénario considéré. Les études d'effets fournissent les relations permettant de passer de l'émission totale à l'immission, puis les fonctions-critères permettent de passer de l'immission à l'index de gravité partielle de TOXICITE g_t .
- . En ce qui concerne la DUREE et l'ETENDUE, soit le modèle RETINE, soit les études d'effets, fournissent les données initiales (par exemple, la durée, la fréquence de l'émission, la persistance des effets, respectivement la portion du récepteur global exposé à l'émission). Puis des fonctions-critères spécifiques permettent de passer des données initiales aux index de gravité partielles de DUREE g_d et d'ETENDUE g_e .
- . Les index de gravité partielle sont combinés au moyen d'un arbre d'agrégation afin d'obtenir l'index de gravité à introduire dans la matrice des effets. La structure de l'arbre d'agrégation peut varier selon les cas et selon les choix de l'utilisateur.
- . Tous les index de gravité sont exprimés à l'aide d'une échelle allant de zéro à cinq. La valeur zéro représente l'absence d'effet, et la valeur cinq représente l'effet le plus grave, le plus prolongé, le plus étendu, etc.

La détermination des index de gravité par récepteur est obtenue par l'agrégation de tous les index de gravité figurant dans la colonne correspondante de la matrice des effets (chiffres 11-12 de l'organigramme).

Cette agrégation par récepteur doit remplir les conditions suivantes :

- . Le résultat de l'agrégation est supérieur ou égal à tout index de gravité intervenant dans l'agrégation. Par exemple, si l'index de gravité d'une émission sur le récepteur FORET est 3, le résultat de l'agrégation doit être supérieur ou égal à 3.

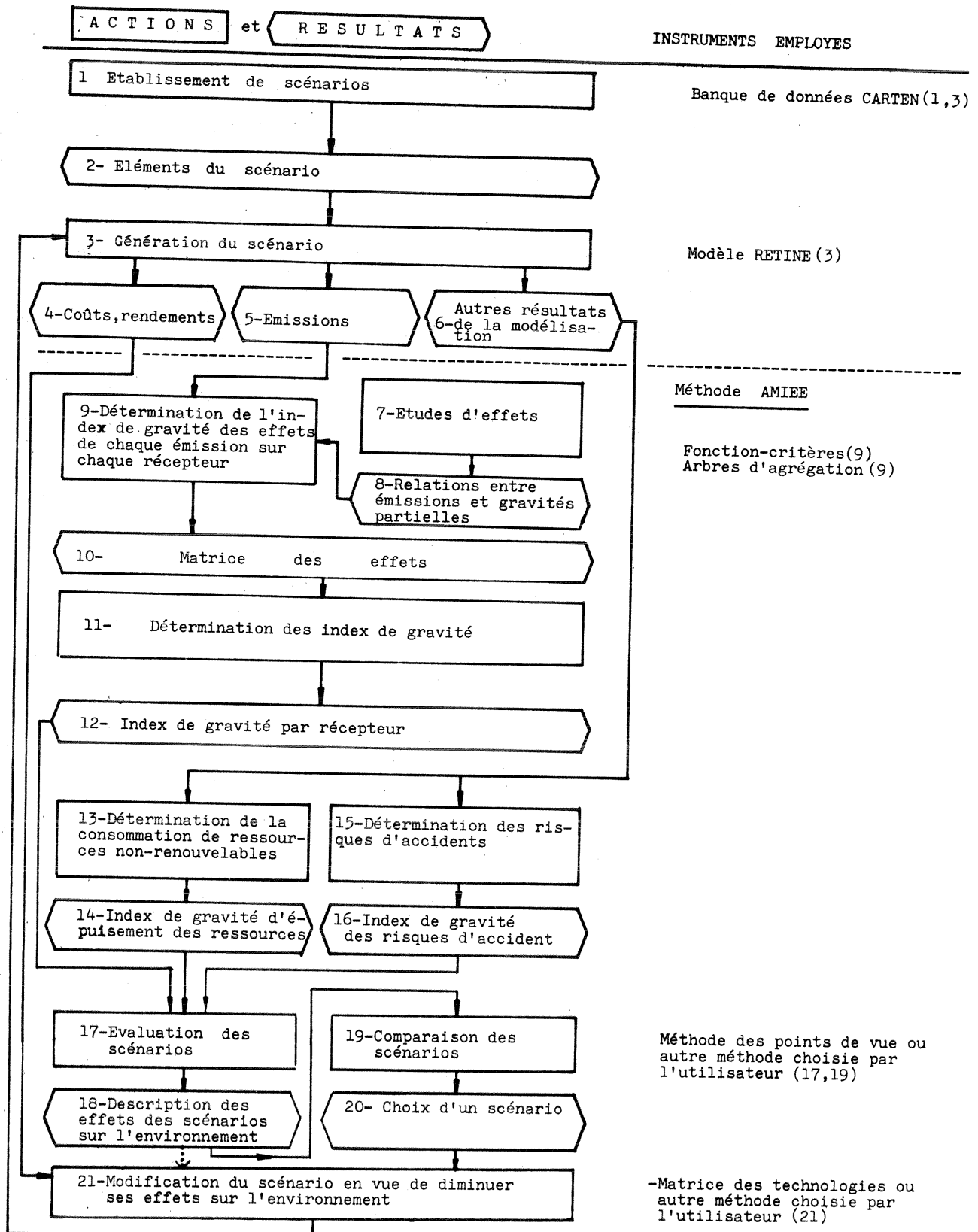


Figure C3 : Organigramme de la méthode AMIEE dans le cadre de la modélisation

E M I S S I O N S		R E C E P T E U R S						
		SANTÉ HUMAINE	HABITAT HUMAIN	ECOSYSTEMES				CLIMAT
				FORET	AGRICULTURE	EAUX	AUTRES	
<u>DANS L'AIR</u>								
Particules en suspension								
SO _x								
NO _x								
Hydrocarbures								
CO								
CO ₂								
Plomb								
Radionuclides								
Chaleur								
<u>DANS L'EAU</u>								
Hydrocarbures								
Radionuclides								
Chaleur								
<u>PAYSAGE</u>								
Occupation d'espace								
Coupure								
Présence								
Prélèvement d'eau								
<u>DIVERS</u>								
Bruit des sources mobiles								
Déchets solides inertes								
Déchets radioactifs								
Index de gravité par récepteur								
Coefficients de pondération								

Index de gravité des effets
de chaque émission sur
chaque récepteur

Figure C4 : Matrice des effets (émission-récepteur)

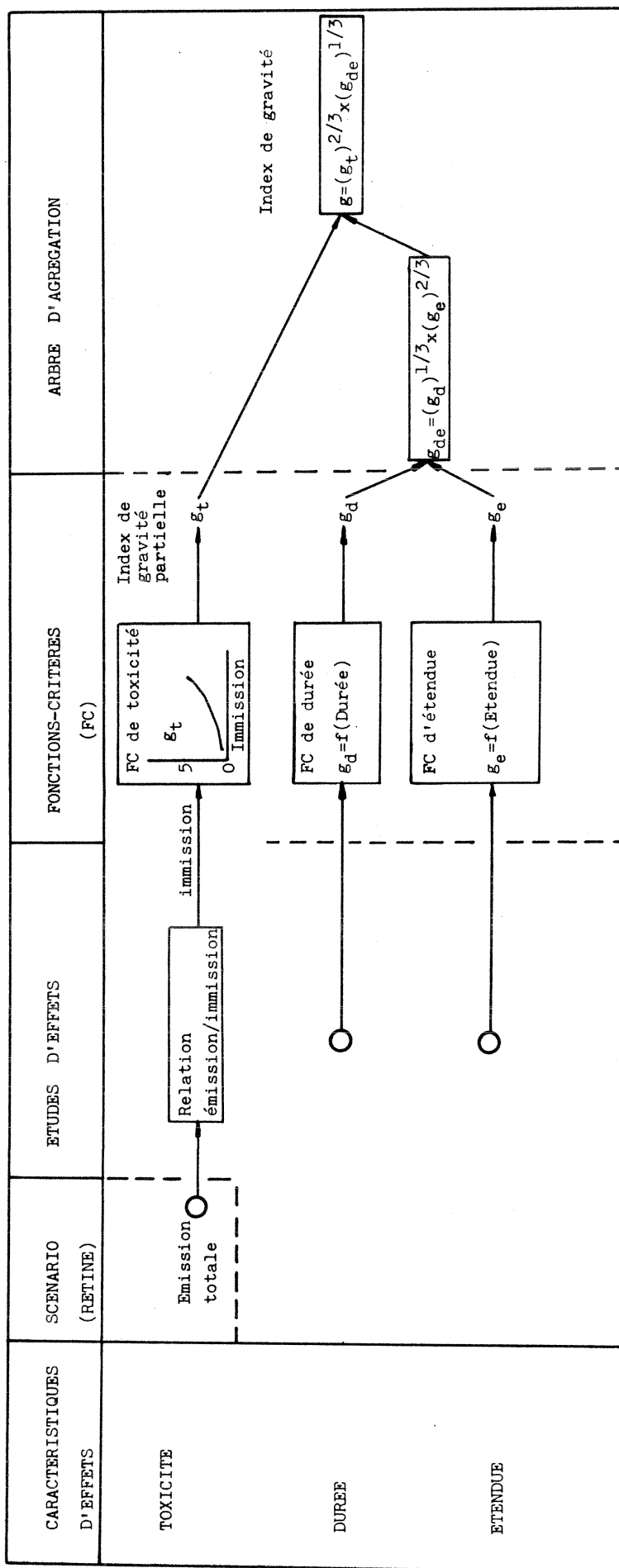


Figure C5 : Exemple de détermination d'une gravité (chiffres 7, 8 et 9 de l'organigramme de la figure C3)

. Le résultat de l'agrégation est avant tout le reflet des index de gravité les plus élevés. En particulier, il est évident que quatre index ayant la valeur 1, donc traduisant un effet très faible, n'ont pas ensemble la même importance qu'un index de gravité ayant la valeur 4, traduisant un effet très grave. Cinq index de gravité de 1 n'impliquent pas la destruction totale du récepteur, comme c'est le cas d'un index de gravité de 5.

La méthode d'agrégation proposée est la suivante :

- 1) Si l'un des index de gravité est égal à 5, le récepteur est totalement détruit et toute agrégation est inutile.
- 2) Si tous les index de gravité g_i sont inférieurs à 5, l'agrégation s'effectue comme suit :

$$g_{\text{récepteur}} = \log_b (\sum b^{g_i}) = \frac{\log_{10}(\sum b^{g_i})}{\log_{10}(b)}$$

où b est la base du logarithme.

Remarques :

- . Plus la valeur de b est élevée, plus les index les plus élevés ont de poids. Il faut agréger b index de niveau n pour que l'index résultant atteigne le niveau $n+1$. En pratique, l'utilisateur fixe la valeur de b . A titre d'orientation, nous recommandons la valeur $b = 10$.
- . Le résultat de l'agrégation doit être interprété avec prudence. Bien que ce résultat soit exprimé par un nombre généralement compris entre 0 et 5, la signification de ce nombre n'est plus strictement liée à un barème. Il devra de préférence être interprété de manière relative, en le comparant au résultat correspondant d'un autre scénario.

Un index de gravité d'épuisement des ressources et un index de gravité des risques d'accident sont déterminés parallèlement à l'établissement de la matrice des effets (Chiffres 13-16 de l'organigramme).

La dimension du résultat est égale au nombre de points de vue considérés. A ce stade de l'étude, elle est de 9. Elle correspond aux 7 récepteurs plus les 2 index qui viennent d'être mentionnés. Les choix subjectifs ont jusqu'ici consisté surtout dans l'établissement des barèmes de gravité, des arbres d'agrégation et de la méthode d'agrégation par colonne.

L'étape suivante, qui conduit à l'évaluation finale, est illustrée à la figure C6. Elle consiste à agréger les 9 index de gravité. L'utilisateur doit donc décider de l'importance relative des récepteurs, par exemple

comparer l'importance de la santé humaine à celle de la forêt. Il exprime ce choix au moyen de facteurs de pondération.

La combinaison des index de gravité des récepteurs et des index de gravité relatifs aux ressources et aux accidents peut se faire par la méthode des "points de vue" illustrée à la figure C6. L'exemple de la figure C6 illustre l'utilisation de différents points de vue, permettant d'atteindre successivement les dimensions d'analyse 5, 3, 2 et 1. La dimension 1 représente le point de vue global, dont le caractère est unidimensionnel.

La pondération des récepteurs, la formation des points de vue, etc, sont du ressort de l'utilisateur, du fait de leur nature très subjective. "L'équipe technique" devra se contenter d'indiquer les méthodes et d'assister l'utilisateur dans leur application.

L'ensemble des points de vue considérés permet soit d'évaluer individuellement chaque scénario, soit de les comparer entre eux (chiffres 17 à 20 de l'organigramme).

A partir de ces résultats, il est possible, en poussant plus loin l'analyse, d'identifier les récepteurs les plus touchés et les émissions les plus dommageables. Ces dernières peuvent être évaluées, soit en valeur absolue, soit en valeur relative, par rapport à l'énergie transformée, stockée, transportée ou utilisée.

Toutes les considérations qui précèdent permettent de déterminer des modifications de scénarios destinées à diminuer leurs effets sur l'environnement (chiffre 21 de l'organigramme).

2.4. Etudes annexes

2.4.1. Coûts de diminution

Ce sont les coûts résultant des efforts de réduction des émissions. En particulier, les coûts de diminution des gaz d'échappement d'automobile font l'objet d'un rapport (Réf. 15). Les résultats sont présentés sous une forme qui permet leur introduction dans la banque de données CARTEN. Cela permet, lors d'analyses de stratégies énergétiques, de déterminer l'efficacité et le coût de ces mesures au niveau de la Suisse.

2.4.2. Normes de protection de l'environnement

Une étude a été effectuée sur les éléments du droit fédéral suisse qui protègent l'environnement dans le domaine de l'énergie. Elle contient également des comparaisons avec des normes étrangères (Réf. 16).

MATRICE DES EFFETS EMISSION-RECEPTEUR

Figure C6 : Exemple d'évaluation finale

3. INTERACTION AVEC LE VOLET MODELISATION

3.1. Contributions à la banque de données CARTEN

Le volet ENVIRONNEMENT a contribué à l'établissement de la banque de données CARTEN en fournissant les données d'émissions spécifiques qui manquaient, et en corrigeant d'autres qui s'étaient avérées inexactes.

Sa contribution principale concerne les émissions spécifiques de polluants chimiques dues aux technologies de transport (Réf. 15) et aux centrales thermiques électriques au fuel ainsi que des caractéristiques de l'emprise territoriale exprimée en m² par kW de puissance moyenne. (Réf. 18, 22, 23).

3.2. Analyse de scénarios énergétiques

Le programme du modèle RETINE, sur la base des émissions spécifiques fournies par la banque de données CARTEN, calcule l'émission annuelle totale de chaque polluant, cumulée le long des chaînes énergétiques. On obtient ainsi le profil des émissions totales pour l'année de référence ou pour n'importe quel scénario énergétique futur généré à l'aide de l'algorithme d'affectation proportionnelle utilisé par le volet MODELISATION.

Les émissions totales obtenues constituent les données de base pour la description des effets sur l'environnement par la méthode AMIEE (voir 2.3.). Cette description se présente sous la forme d'une matrice des effets émission-récepteur, d'un index d'épuisement des ressources et d'un index des risques d'accidents qui permettent d'évaluer le scénario.

En considérant les effets, l'épuisement des ressources et les risques d'accidents les plus graves, il est possible de rechercher les technologies qui en sont principalement responsables. On peut alors générer puis analyser des variantes au scénario énergétique considéré, ceci de deux manières :

- en imposant des contraintes d'utilisation aux technologies les plus dommageables (par exemple en imposant une limite aux flux d'énergie). La demande d'énergie utile sera alors satisfaite par une nouvelle répartition des flux dans le réseau énergétique, avec pour résultat une diminution des émissions, une augmentation de la durée des ressources et une diminution des risques d'accidents.

- en modifiant les attractivités des technologies, soit :
 - . en diminuant les attractivités des technologies dont les effets sont les plus nuisibles
 - . en augmentant les attractivités des technologies dont les effets sont les moins nuisibles.

La modification des attractivités intervient dans une procédure de rétroaction ouverte aux utilisateurs du modèle. Cette modification est effectuée à l'aide de quelques essais d'ajustement.

4. TEST D'APPLICATION

4.1. But et signification du test

Le test décrit ici a pour but de vérifier le fonctionnement de la méthode AMIEE et de la concrétiser. Les résultats obtenus dans le cadre de ce test doivent être considérés comme illustratifs.

4.2. Scénario

La méthode AMIEE servant avant tout à comparer des scénarios, il eut été désirable d'effectuer des tests sur plusieurs scénarios. Faute de temps, il n'a été possible d'effectuer qu'un seul test. Ce test porte sur un scénario basé sur des données correspondant à la situation existant en 1975 et, pour quelques données que nous n'avons pas pu obtenir, à celles d'années légèrement antérieures ou postérieures.

Ce scénario 1975 est autant que possible en accord avec la distribution des flux énergétiques établie par le volet CONSOMMATION. Il a été recalculé par le volet MODELISATION au moyen du modèle RETINE ; c'est la raison pour laquelle certaines de ces données ne se correspondent pas exactement. La figure C7 présente les émissions totales calculées par le modèle RETINE et utilisées dans le test.

Emissions totales		
<u>Dans l'air</u>		
Particules en suspension	45	kt/a
SO _x	93	kt/a
NO _x	115	kt/a
Hydrocarbures	100	kt/a
CO	400	kt/a
CO ₂	38 000	kt/a
Pb	0,56	kt/a
Radionuclides	50	KCi/a
Chaleur	10 000	MW(th)
<u>Dans l'eau</u>		
Hydrocarbures	2,8	kt/a
Radionuclides	0,89	MCi/a
Chaleur	510	MW(th)
Demande totale en énergie primaire	24 043	MW/a

Unités : kt/a = milliers de tonnes par an


MW(th) = Mégawatt thermiques


MCi/a = millions de Curie par an


Figure C7 : Emissions totales, pour le scénario 1975

4.3. Matrice des effets

La matrice des effets du scénario 1975 est présentée à la figure C8. La méthode permettant de déterminer les index de gravité constituant la matrice est décrite dans ses grandes lignes sous 2.3.2. La référence 28 décrit avec plus de détails le déroulement des tests. Le contenu des cases de la matrice est représenté par les symboles suivants :

 Il a été admis à priori que l'émission correspondant à la case ainsi supprimée n'a pas d'effet sur le récepteur, du moins pour des scénarios plausibles. C'est le cas, par exemple, des effets du bruit sur le climat. Un utilisateur pourrait, s'il le désire, demander qu'une case ainsi supprimée soit réintroduite.

 Non déterminé. Il s'agit d'effets qui n'ont pas été analysés dans le cadre du test effectué, faute de temps pour réaliser les études d'effets nécessaires. Il pourrait également s'agir, dans le futur, de l'option d'un utilisateur.

 Effet dont le calcul a montré qu'il était négligeable dans le cas particulier du scénario analysé. A moins que l'on ne postule l'existence de seuils d'effet, il est délicat de parler d'effet nul. Il est cependant correct de représenter des effets négligeables par des index de gravité nuls représentés par 0.

Les autres cases contiennent les index de gravité non nuls décrivant des effets non négligeables.

Les index de gravité par récepteur ont été déterminés par la méthode exposée sous 2.3.2..

Des coefficients de pondération ont été choisis et apparaissent au bas de la matrice des effets. Dans des cas d'application réelle de la méthode AMIEE, c'est à l'utilisateur que reviendrait ce choix, qui exprime l'importance relative donnée aux récepteurs.

4.4. Index d'épuisement des ressources énergétiques et index de risques d'accidents

Ces index, calculés selon les méthodes indiquées sous 2.2.4. et 2.2.5., sont présentés dans les figures C9 et C10.

4.5. Evaluation finale

L'évaluation finale est effectuée conformément au processus décrit sous 2.3.2.. A titre d'exemple, les neuf index de gravité présentés dans les figures C8, C9 et C10 ont été agrégés suivant les différents points de vue décrits à la figure C6. Les résultats, dont les dimensions respectives sont cinq, trois, deux et un, ont été obtenus en effectuant les moyennes des index de gravité selon les pondérations indiquées aux figures C8, C9 et C10. Ces résultats sont présentés dans la figure C11. Ils n'appellent aucun commentaire de notre part, étant donné le caractère illustratif du présent test d'application.

E M I S S I O N S		R E C E P T E U R S						
		SANTÉ HUMAINE	HABITAT HUMAIN	ECOSYSTEMES				CLIMAT
				FORET	AGRICULTURE	EAUX	AUTRES	
<u>DANS L'AIR</u>								
Particules en suspension		3,2	2,7			~ 0		1,9
SO _x		3,3	3,4	~ 0	~ 0	3,0	~ 0	1,9
NO _x		1,7		1,8	1,8	2,4	1,8	1,3
Hydrocarbures		1,7		1,8	1,8	1,6	1,8	
CO		2,7						
CO ₂								1,9
Plomb		1,8			2,8	~ 0		
Radionuclides		2,1						
Chaleur								1,4
<u>DANS L'EAU</u>								
Hydrocarbures						0,7		
Radionuclides		~ 0				~ 0		
Chaleur						2,3		
<u>PAYSAGE</u>								
Occupation d'espace			~ 0	4,2	3,9	4,0	4,0	
Coupure			~ 0	3,8	3,6	3,1	3,6	
Présence			~ 0	2,6	2,4	0,9	2,5	
Prélèvement d'eau				~ 0	~ 0	3,9	3,6	
<u>DIVERS</u>								
Bruit des sources mobiles		3,4	3,4					
Déchets solides inertes				N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
Déchets radioactifs		N.D.						
Index de gravité par récepteur		3,8	3,8	4,3	4,1	4,3	4,3	2,5
Coefficients de pondération		1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0

Figure C8 : Matrice des effets, pour le scénario 1975

Ressource	α	Index g
Charbon	0,019	1
Pétrole	0,69	4,4
Gaz naturel	0,02	3,6
Uranium *	0,08	4,1
Bois		0
Biomasse		0
Index d'épuisement des ressources		3,5
Coefficient de pondération		1,0

α = part dans l'approvisionnement
en énergie primaire

Figure C9 : Epuisement des ressources énergétiques, pour le scénario 1975

* sans recours aux surrégénérateurs

Type d'accident et cause	Index
<u>Accidents de routine</u>	3,3
<u>Catastrophes à grande échelle</u>	
. Barrages hydroélectriques à accumulation	3,1
. Centrales nucléaires	3,7
Index de risques d'accidents	3,9
Coefficient de pondération	1,0

Figure C10 : Risques d'accidents, pour le scénario 1975

POINTS DE VUE	INDEX DE GRAVITE par point de vue
<u>DIMENSION 5</u>	
SANTE HUMAINE	3,8
PAYSAGE	4,2
CLIMAT	2,5
EPUISEMENT DES RESSOURCES	3,5
RISQUES D'ACCIDENTS	3,9
<u>DIMENSION 3</u>	
HOMME	3,8
NATURE	3,7
RESSOURCES	3,5
<u>DIMENSION 2</u>	
HOMME	3,8
NATURE ET RESSOURCES	3,6
<u>DIMENSION 1</u>	
GLOBAL	3,7

Figure C11 : Evaluation finale du scénario 1975 par la méthode des points de vue.

5. RAPPORTS ANNEXES ET PUBLICATIONS

- [1] Prof. L. BOREL et L. KRAYENBÜHL : Elaboration d'une fonction de dégradation. Application au cas du SO_2 en Suisse. Publications de la Commission fédérale de la conception globale de l'énergie. Etude N° 4. Berne, 1976.
- [2] Prof. L. BOREL : La fonction de dégradation, un nouveau concept pour la protection de l'environnement. Annexe I du document 1). 1975.
- [3] Prof. L. BOREL et L. KRAYENBÜHL : Principes de l'analyse économique de la pollution. Annexe II du document 1). 1975.
- [4] Prof. L. BOREL et L. KRAYENBÜHL : Le SO_2 , les coûts des dommages et la fonction de dégradation. Annexe III du document 1). 1976.
- [5] J.M. COMMENT : Effets des oxydes d'azote sur les êtres vivants. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1976.
- [6] J.M. COMMENT : Effets du monoxyde de carbone sur les êtres vivants. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1976.
- [7] D. PRZYBECKA : Effets du plomb et de ses dérivés sur les êtres vivants. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1976.
- [8] J. SIGRIST : Effets des hydrocarbures sur les êtres vivants. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1976.
- [9] J. SIGRIST : Effets des aldéhydes sur les êtres vivants. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1976.
- [10] D. PRZYBECKA : Les effets des radiations sur l'être humain. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1977.
- [11] M.A. ERBETTA, M. ROLLIER : Rapport sur la détermination pratique du coût des dommages. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1977.

- [12] M.A. ERBETTA, B.L. REYMOND : Proposition d'une méthode d'analyse des données d'effets sur l'environnement des stratégies énergétiques. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1977.
- [13] M. ROLLIER : Prélèvement d'eau, émission, effets sur l'environnement. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1978.
- [14] M.A. ERBETTA : La nécessité et les limites de l'analyse multidimensionnelle dans la planification. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1978.
- [15] B.L. REYMOND : Définition des technologies de diminution des émissions de gaz d'échappement d'automobiles. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1978.
- [16] B.L. REYMOND : Droit fédéral sur la protection de l'environnement dans le domaine de l'énergie. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1978.
- [17] B.L. REYMOND : Les particules en suspension : émissions, immissions et effets sur l'homme et l'environnement en Suisse. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1979.
- [18] M. ROLLIER : Effets de la production d'énergie sur le paysage : centrales hydroélectriques à accumulation. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1979.
- [19] M.A. ERBETTA : Méthode de prise en considération des influences sur l'environnement dans la description et la génération de stratégies de production d'énergie. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1979.
- [20] B.L. REYMOND : Le dioxyde de soufre (SO_2) : émissions, immissions et effets sur l'homme et sur l'environnement en Suisse. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1979.
- [21] M.A. ERBETTA : Le bruit des sources mobiles en Suisse. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1979.

- [22] M. ROLLIER : Effets de la production d'énergie sur le paysage : raffineries. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1979.
- [23] M. ROLLIER : Effets de la production d'énergie sur le paysage : oléoducs, gazoducs. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1979.
- [24] P. DIND : Energie et accidents : évaluation des impacts sur l'homme et l'environnement des accidents liés à l'exploitation des différentes sources d'énergie. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1979.
- [25] P. DIND : Epuisement et renouvellement des ressources énergétiques. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1979.
- [26] M. ROLLIER : Effets de la production de l'énergie sur le paysage : généralités. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1979.
- [27] A. GOGNIAT : Rejets thermiques dans les eaux. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1980.
- [28] B.L. REYMOND : La méthode AMIEE : Analyse Multidimensionnelle de l'Interaction Energie - Environnement. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1980.
- [29] M. ROLLIER : Impact d'ouvrages sur le paysage : essai d'évaluation. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1980.
- [30] R. MORISOD et Prof. L. BOREL : Application de la comptabilité exergétique au problème du chauffage à distance en Suisse. Publications de la Commission fédérale de la conception globale de l'énergie. Etude N° 3. Berne, 1976.
- [31] Prof. L. BOREL et G. YANNI : Aspect thermodynamique du remplacement du chauffage individuel par d'autres modes de chauffage. EPF-L - Institut de Thermodynamique. Lausanne, 1977.
- [32] A. GOGNIAT : Compléments d'études d'effets. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1980.
- [33] L. BOREL : Pour un plan solaire national. EPF-L. Polyrama N° 35. Lausanne, 1977.

D. ENERGIE SOLAIRE

1. OBJECTIFS ET MOYENS MIS EN OEUVRE

Les objectifs d'une recherche dépendent du contexte politique, économique et social, notamment si la recherche a un caractère d'application. Ceci est le cas notamment pour l'énergie solaire ; sujet de recherches avec des moyens limités depuis plus de 50 ans, ce secteur a connu un essor énorme depuis quelques années.

Déjà avant 1973, quelques instituts de l'EPFL s'occupaient de l'énergie solaire, avec des moyens relativement modestes encore.

De plus, leur volonté de profiter de la situation privilégiée dans une Haute Ecole, représentée par la présence de compétences pluridisciplinaires, les incitait à une collaboration formant le noyau du futur Projet d'Ecole, leur dénominateur commun étant l'énergie dans le bâtiment.

En 1974, la recherche s'intensifiait par des subsides du FN pour 2 projets.

La crise d'énergie 1973/74 conduisait à une certaine prise de conscience de l'opinion publique, et la question d'énergie devenait un problème politique. L'énergie solaire était utilisé comme argument dans la polémique antinucléaire et des chiffres fantastiques quant au potentiel de l'énergie solaire pour la Suisse furent énoncés. En opposition, des voix ne manquèrent pas, niant toute signification à l'énergie solaire pour le pays, par des raisons soit économiques ("l'énergie solaire ne sera jamais rentable"), soit énergétiques ("les installations solaires produisent moins d'énergie dans leur vie qu'il y en a fallu investir pour leur fabrication").

Dans cette situation, le but triple suivant du volet SOLAIRE a été défini :

- contribuer au développement de l'héliotechnique par des recherches concernant des problèmes particuliers.
- devenir compétent, par ces recherches, pour l'évaluation du potentiel de l'énergie solaire en Suisse et l'estimation des données nécessaires pour inclure cette technique dans le modèle énergétique global élaboré par le volet MODELISATION du P.E. ENERGIE.

- devenir compétent pour intensifier la formation et l'information en héliotechnique, notamment par l'enseignement à l'EPFL, mais aussi par une activité dans les milieux professionnels concernés.

L'héliotechnique, science nouvelle et en développement rapide, a des filières très variées (photovoltaïsme, photochimie, photosynthèse, applications thermiques, etc) ; il convient d'en choisir un secteur restreint, ce qui a été fait par les deux considérations suivantes :

- plus de la moitié de toute l'énergie est destinée, en Suisse, au chauffage des bâtiments et à l'eau chaude ; il convient donc de concentrer l'effort d'évaluation sur ce secteur, le plus important.
- les travaux en cours et les collaborations déjà en place doivent être utilisés.

C'est ainsi que le Volet SOLAIRE concerne "L'énergie solaire utilisée pour le chauffage des bâtiments" comprenant ici :

- les systèmes passifs du chauffage des bâtiments par l'énergie solaire
- les systèmes actifs
 - . pour le chauffage (par air ou eau)
 - . pour la préparation d'eau chaude sanitaire
 - . pour des petites machines solaires
- le stockage soit par chaleur latente, soit par chaleur sensible.

Dans toute cette technique, il est important de considérer les deux aspects :

- . le développement des composants (capteurs, façades, machines, accumulateurs).
- . la performance du système, qu'il soit purement solaire ou combiné avec une autre source d'énergie, ce qui est très fréquent.

Ainsi les trois buts mentionnés ci-dessus ont conduit aux travaux suivants :

- Recherches sectorielles

- 1.- Captage en façade (Chaire de Construction du département d'architecture, Laboratoire de Physique Théorique)
- 2.- Systèmes actifs de préparation d'eau chaude (Institut de Thermique Appliquée)
- 3.- Systèmes combinés solaire + pompe à chaleur (Institut de Thermodynamique et Institut de Thermique Appliquée)
- 4.- Machines thermiques solaires à absorption directe du rayonnement (Institut de Thermique Appliquée)

5.- Stockage de l'énergie thermique par chaleur latente de fusion

(Institut de Génie Chimique)

o Evaluation du potentiel

- . Evaluation socio-économique de l'énergie solaire pour le chauffage et l'eau chaude (Institut de la Recherche sur l'Environnement Construit)
- . Introduction des technologies solaires dans les différents scénarios étudiés par le Volet MODELISATION du P.E. ENERGIE ; l'étude de ces scénarios se fait par le programme RETINE (décrit dans chapitre C).

o Formation

Initier et améliorer la formation par échange d'expériences ou par collaboration directe :

- . cours obligatoires inclus dans les plans d'études des architectes et ingénieurs mécaniciens
- . conférences ou journées de formation en collaboration avec des associations professionnelles (SIA)
- . information à différents niveaux (commissions cantonales et communales ; publique).

2. RECHERCHES SECTORIELLES

2.1. Captage en façade

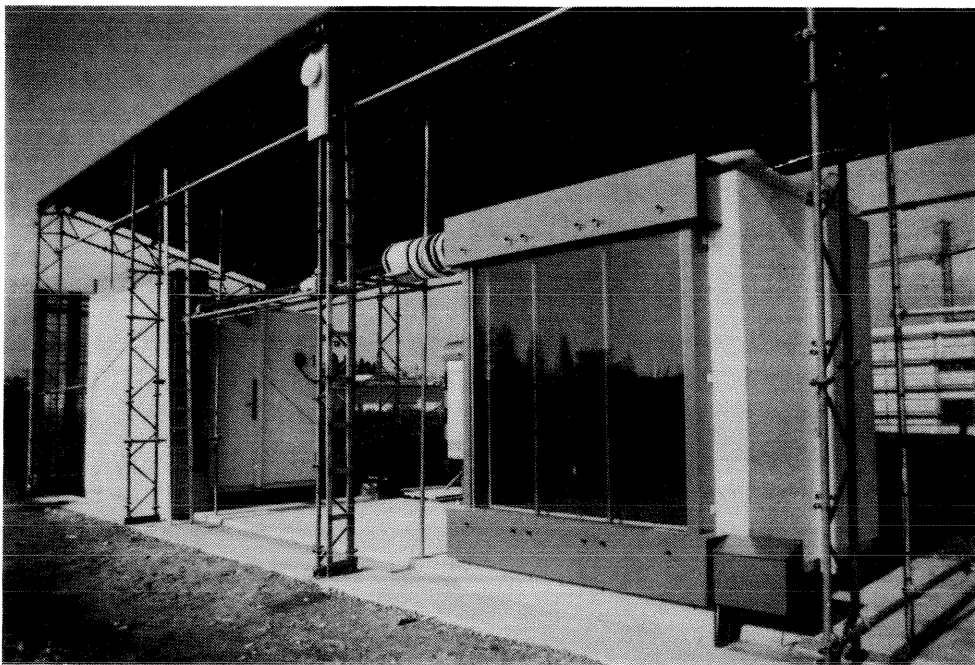
2.1.1. Introduction

Il est convenu de classer les systèmes passifs en quatre catégories :

- . gains directs : fenêtres, vitrages, etc...
- . gains indirects : mur capteur-stockeur à eau ou en maçonnerie (mur Trombe)
- . serre : serre simple ou accolée à un espace habitable
- . thermosiphon : à eau ou à air, pour le chauffage de l'eau domestique ou des locaux.

Les recherches menées dans le cadre du P.E. ENERGIE concernent les trois premières catégories. Elles visent à établir le bilan thermique instantané et moyen sur une période variant de 1 jour à quelques mois. Ceci permet ensuite de prévoir les gains solaires ainsi que les conditions de fonctionnement des différents systèmes en fonction du climat local.

Les recherches se sont déroulées sur le stand d'essai en climat réel du groupe de recherche en énergie solaire (STESO) situé sur le site de l'EPF à Ecublens. Une série de cellules calorifugées permettent de mesurer le bilan thermique des systèmes étudiés. Les mesures qui comprennent également l'ensemble des données météorologiques sont enregistrées automatiquement toutes les demi-heures puis traitées sur l'ordinateur CYBER du Centre de Calcul. Ce travail expérimental s'accompagne d'un important travail théorique de modélisation mathématique et de simulation sur ordinateur.



Les données météorologiques accumulées depuis 1976 constituent un outil de travail indispensable, et ceci d'autant plus que les seules données existantes jusque là pour la région lausannoise se limitaient à des heures d'ensoleillement (Réf. 1).

2.1.2. Etudes réalisées

a) Systèmes à gains directs

C'est le mode de captage le plus simple que l'on puisse imaginer : la chaleur captée provient directement du rayonnement solaire qui pénètre dans la construction. De ce fait, la fenêtre représente donc le "capteur" le plus ancien et le plus répandu. En période de chauffage, ce "capteur" ne conduit toutefois pas forcément à un bilan thermique positif, et cela pour les principales raisons suivantes :

Le capteur semi-transparent à air

Ce capteur de type hybride (Réf. 3) permet aussi bien de tirer profit des apports passifs directs par faible rayonnement que d'extraire de la chaleur lorsque le flux est suffisant. Le capteur se compose d'un ensemble de 3 lames de verre, la première et la troisième (extérieure et intérieure) sont en verre clair, la deuxième est en verre absorbant. Un ventilateur permet de faire circuler l'air entre les deux lames intérieures.

Par faible rayonnement, (moins de $300 [W/m^2]$), la ventilation est déclenchée. L'énergie solaire incidente est toutefois partiellement convertie en chaleur dans le verre absorbant. Celui-ci s'échauffe et il s'en suit une élévation de température de la vitre intérieure. De ce fait, les pertes de chaleur au travers du mur capteur s'en trouvent diminuées, annulées ou même inversées.

Lorsque le flux incident est plus élevé, le ventilateur est enclenché ; de l'air chaud est alors à disposition, soit pour chauffer un stock (granulé ou intégré à la construction), soit pour ventiler des locaux dépourvus de gains directs.

Un système expérimental en vraie grandeur (surface de captage de $5 m^2$) a été réalisé, ses performances ont été mesurées durant un peu plus d'une année. En parallèle, un modèle mathématique a été développé, les résultats numériques ont été comparés aux mesures.

La figure D2 illustre la fluctuation des températures de l'air à la sortie du collecteur en fonction du flux solaire incident et de la température extérieure.

La figure D3 quant à elle donne les performances du système mesurées durant les quatre premiers mois de 1977. Les gains comprennent aussi bien les apports passifs directs que les apports réalisés grâce à la ventilation. Sur les quatre mois considérés la ventilation a fonctionné 66 jours, et la température journalière moyenne de l'air chaud extrait a fluctué entre 27 et 49°C.

La notion de rendement de captage est difficile à formuler dans les cas d'un système passif étant donné que ce rendement dépend fortement des besoins momentanés de la construction et de la capacité thermique du système. Pour cette raison nous préférons introduire la notion de $k_{apparent}$ définie comme suit :

$$k_{app} = k - \frac{E_{inc} \cdot a}{\Delta \theta} [W/m^2K]$$

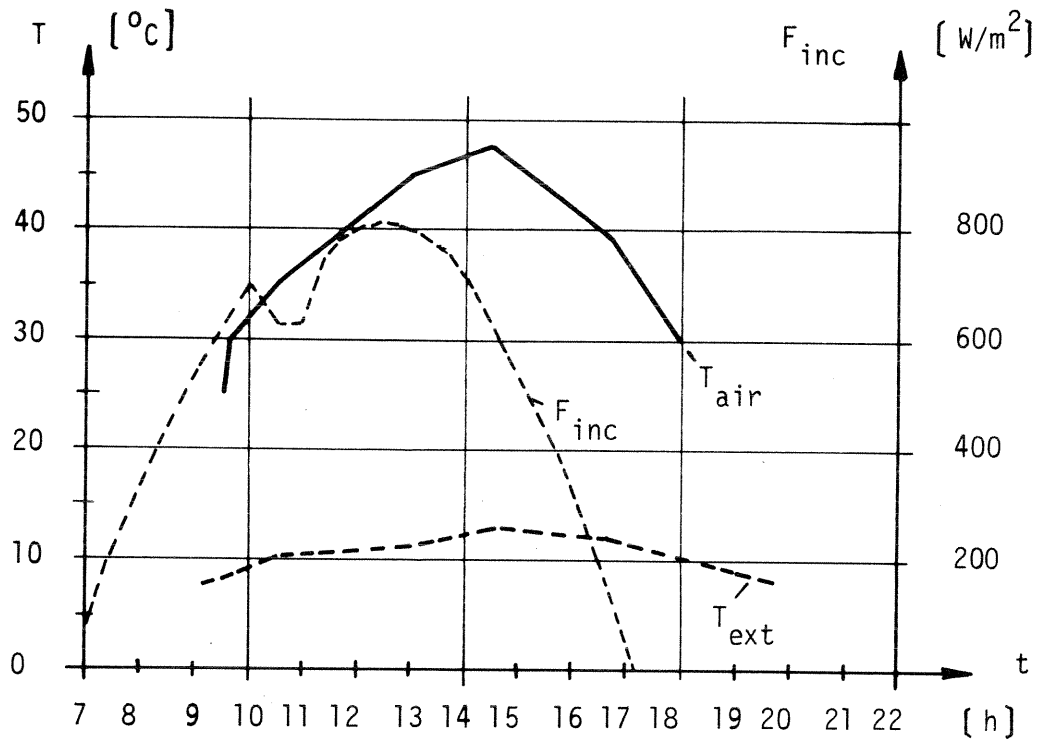


Figure D2 : Température à la sortie du capteur (T_{air}) en fonction du flux incident vertical sud (F_{inc}) et de la température extérieure de l'air (T_{ext}).

Mois	E_{inc} (vert. sud) [kWh/m ² mois]	T_{ext} [$^{\circ}\text{C}$]	Pertes [kWh/m ² mois]	Gains [kWh/m ² mois]	Bilan [kWh/m ² mois]	k_{app} [W/m ² k]
Janvier	37.7	2.4	26.2	17.5	- 8.7	+ 0.67
Février	52.8	5.4	19.6	29.7	+ 10.1	- 1.06
Mars	93.1	5.2	25.0	61.3	+ 36.3	- 3.66
Avril	72.4	7.1	18.6	39.0	+ 20.4	- 2.27

Figure D3 : Performances du capteur semi-transparent à air.
Bilan pour les quatre premiers mois de 1977.

Cette grandeur représente la différence entre les déperditions thermiques du système et les apports solaires en $[W/m^2K]$; elle sera positive lorsque les pertes seront supérieures aux gains, négative dans le cas contraire.

Pour le capteur semi-transparent les mesures montrent que tout en ayant k de $2[W/m^2K]$ en l'absence de rayonnement le capteur présente une valeur k_{apparent} de $0.5 [W/m^2K]$ (soit la valeur d'un mur traditionnel correctement isolé) dès que le flux journalier moyen atteint $1.25 [kWh/m^2\text{jour}]$. Au-dessus de $1.5 [kWh/m^2\text{jour}]$, k_{apparent} devient négatif ce qui signifie que les gains dépassent alors les déperditions.

Améliorations possibles du système

Sur la base du modèle mathématique, il a été possible d'optimiser le système. Les gains les plus importants sont obtenus en ajoutant une couche sélective réfléchissant l'infrarouge sur la face extérieure du verre absorbant. Cette amélioration a été apportée à un capteur expérimental. Des mesures sont en cours.

b) Le mur capteur-stockeur

Selon le type d'application ou le genre de construction, ce mode de captage passif peut s'imposer ou tout au moins être utilisé en appoint des gains directs.

Une première étude a porté sur une comparaison systématique de couvertures transparentes et de surfaces absorbantes (Réf. 4). Les mesures ont été effectuées sur des blocs de béton de faible taille ($0.5 m^2$), soigneusement calorifugés sur leurs faces, équipés de la couverture à tester sur leur face avant et munis de sondes de température. De cette manière, 19 combinaisons différentes ont pu être mesurées et comparées. Un modèle mathématique a été développé et ajusté à chacun des cas.

Le comportement thermique du mur capteur considéré a été comparé dans chaque cas, à celui d'un mur conventionnel correctement isolé. ($k = 0.5 [W/m^2K]$). Les conclusions sont les suivantes :

1. Dans nos conditions climatiques, et durant une période hivernale peu favorable ($\bar{E}_s = 1.0 [kWh/m^2\text{jour}]$), seule une combinaison faisant intervenir un vitrage double et une surface absorbante sélective, conduit à un bilan thermique positif.
2. Aussi bien durant l'arrière automne que le printemps, ($\bar{E}_s \geq 2.0 [kWh/m^2\text{jour}]$), toutes les combinaisons considérées conduisent à des gains.

Performances attendues

Sur la base de ces mesures, un programme de simulation a été développé. Celui-ci comprend non seulement le comportement thermique du mur, mais il englobe également la réponse de la construction, ainsi que les conditions de confort à assurer aux occupants (chauffage auxiliaire lorsque la température est insuffisante, ventilation accrue en cas de surchauffe). Les premiers résultats de la simulation effectués sur un hiver sont résumés sur la figure D4.

Le mur Trombe équipé d'un double vitrage présente un comportement thermique meilleur que celui d'un mur traditionnel correctement isolé dès que l'énergie incidente moyenne dépasse 1.5 [kWh/m²jour].

Le calcul montre que dès que l'énergie solaire incidente moyenne dépasse 1.0 à 1.25 [kWh/m²jour], un système à gains directs présente un bilan plus favorable que celui d'un mur capteur-stockeur. Toutefois, cela n'est vrai que si la totalité des apports directs est utilisée.

Un mur capteur-stockeur de grande dimension (6 m²), accolé à une cellule de mesure, est actuellement en cours de test sur le stand d'essais du Groupe Energie Solaire à Ecublens (STESO).

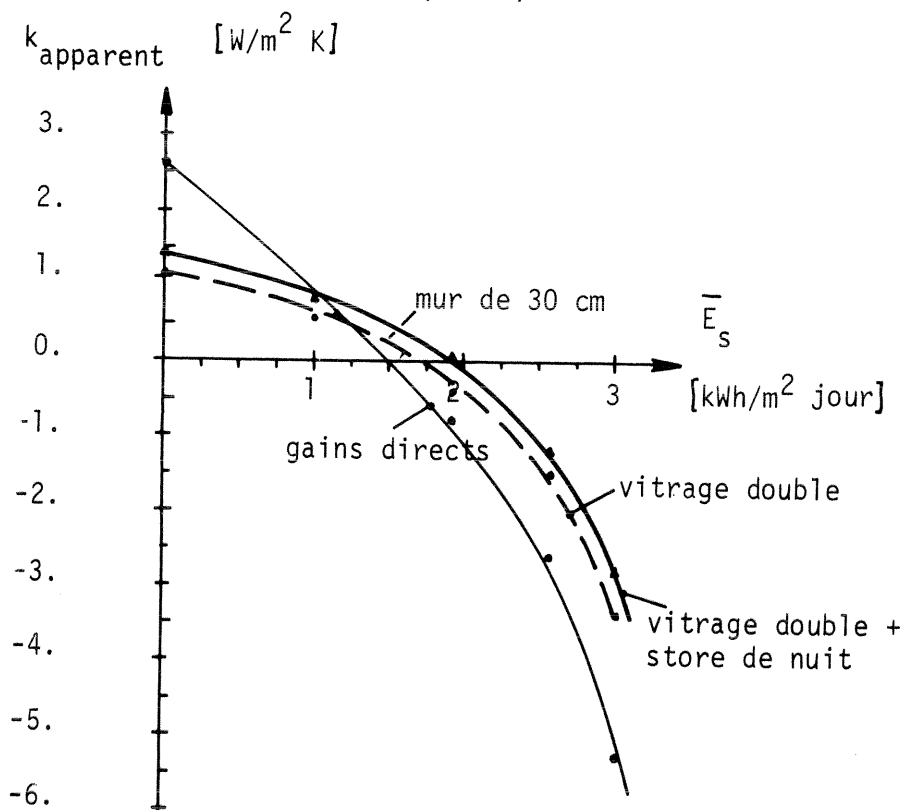


Figure D4 : Variation de $k_{apparent}$ d'un mur capteur-stockeur en fonction du flux solaire journalier moyen.

c) La serre

Du point de vue architectural, la serre représente un moyen de captage intéressant, car, en plus de sa fonction thermique, elle procure à l'habitant, un espace supplémentaire attrayant.

Son application à l'habitat n'est toutefois pas immédiate et une étude insuffisante risque soit de conduire à un rendement de captage négligeable, soit de fournir un espace supplémentaire inhabitable.

Une première étude a porté sur une petite serre agricole modifiée (Réf. 5). Un modèle mathématique a été développé et les prévisions théoriques ont été comparées aux mesures. La figure D5 présente une comparaison entre les valeurs mesurées et les prédictions du modèle développé.

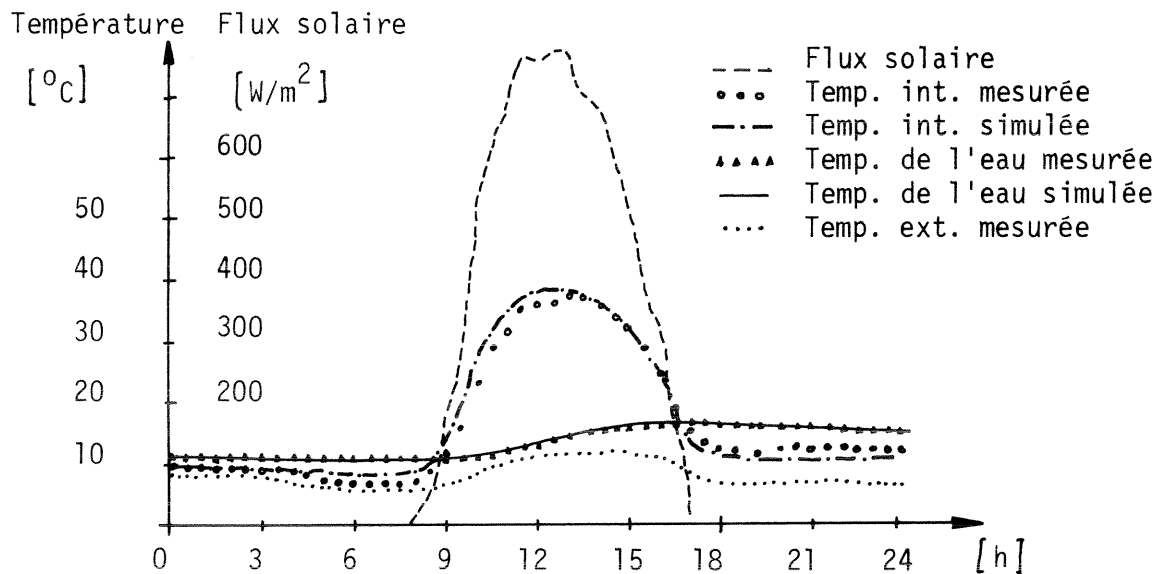


Figure D5 : Comparaisons entre les températures mesurées et les prédictions du modèle mathématique.

Cette expérience a permis de poser les bases d'une étude qui doit être approfondie : le modèle développé doit maintenant être testé sur des configurations différentes (masse thermique différente, isolation nocturne, verres spéciaux, etc...). Les premiers résultats probants confirment l'intérêt représenté par la serre dans l'architecture solaire passive.

2.1.3. Conclusions

Les importantes recherches menées à l'étranger et principalement aux USA sur les systèmes passifs et hybrides, ne peuvent pas être transposés sans autre au climat suisse. Les recherches menées dans le cadre du P.E. ENERGIE permettent de jeter les bases pour une appréciation de possibilités de ces systèmes sous nos différents climats (Alpes, Plateau, Jura, Tessin) et la mise sur pied de méthodes simplifiées et rapides d'évaluation de la contribution de systèmes au bilan thermique d'habitations.

La poursuite de ces recherches se fera dans les directions suivantes :

- . mise au point de systèmes comportant des isolations mobiles efficaces et un meilleur pouvoir de stockage
- . expérimentation d'une construction solaire à plusieurs étages et munie de différents systèmes passifs : le projet LESO, en voie de réalisation sur le site d'Ecublens
- . mesure de performances de maisons solaires passives (programme IEA, Solar Energy) et établissement de bilans thermiques d'habitations (programme IEA, Energy Conservation in Buildings).

2.2. Systèmes actifs de préparation d'eau chaude :

Interaction entre paramètres météorologiques et paramètres du système

2.2.1. Pose du problème

Une installation solaire active de préparation d'eau chaude comprend normalement les capteurs (placés en façade ou sur toit), l'accumulateur, une pompe et la régulation ; elle travaille presque toujours en régime transitoire, à cause des effets :

- . de la météorologie (jour-nuit, nuages)
- . de l'utilisateur (besoins variables en eau chaude)
- . de la régulation (du type on-off).

On se posera la question de savoir si l'aspect non stationnaire doit être inclus dans le dimensionnement ou si la considération quasi-stationnaire usuelle basée sur des données météorologiques moyennes et la caractéristique des capteurs fournie par le constructeur pourrait suffire.

Nos études concernent des installations avec capacité de stockage limitée (jour-nuit), pour répondre aux questions suivantes :

- . l'aspect transitoire influence-t-il considérablement la performance du système ?
- . quelle est la corrélation de cet effet avec les données météorologiques et les paramètres du système de collection du rayonnement solaire
- . quelles sont les conséquences pour le dimensionnement d'installations solaires ?

2.2.2. Etapes de travail

Les résultats élaborés sont le fruit d'une combinaison d'études expérimentales et théoriques comprenant les étapes suivantes :

- a) Instrumentation de plusieurs installations solaires (Genève, Lostorf, Epalinges), pour pouvoir mesurer le comportement transitoire détaillé des composantes (capteurs, accumulateurs, échangeurs, régulation). Le problème de telles mesures calorimétriques paraît simple, mais il s'avère très complexe dans des conditions réelles intermittentes de fonctionnement, (Réf. 21, 22).
- b) Mise au point d'un programme sur ordinateur en conception modulaire pour la modélisation d'installations solaires (programme SSS-ITA, mieux adapté à nos besoins que le programme connu TRNSYS) et validation à l'aide des mesures sous a). Le programme calcule, avec un pas de temps petit, l'évolution des débits, températures et énergies tout en tenant compte du système de régulation et de la chaleur utilisée (Réf. 24). Les figures D6 et D7 montrent les schémas des installations et, à titre d'exemple, la comparaison entre valeurs calculées et valeurs mesurées.
- c) Définition d'un schéma d'installation standard (comprenant capteurs, accumulateur, réglage) avec un profil d'utilisation type basé sur des mesures, voir schéma figure D8.
- d) Définition de cas météorologiques standard, comprenant "beau jour", "Jour nuageux", "jour couvert". Nous avons prouvé que des combinaisons de ces trois cas permettent de représenter suffisamment bien les cas réels (Réf. 23).
- e) Identification d'un mode de comparaison significatif entre cas non-stationnaire et quasi-stationnaire.

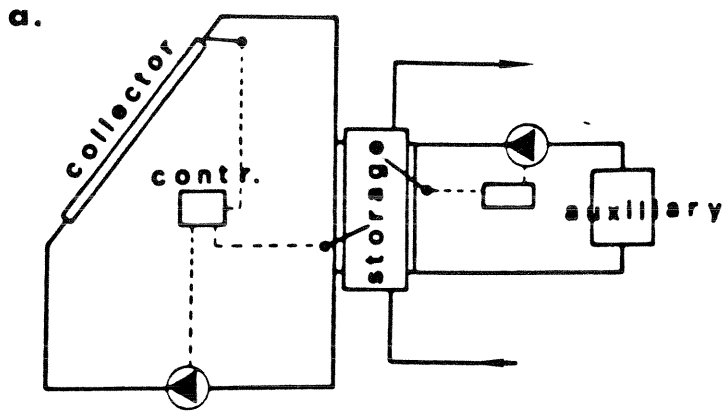
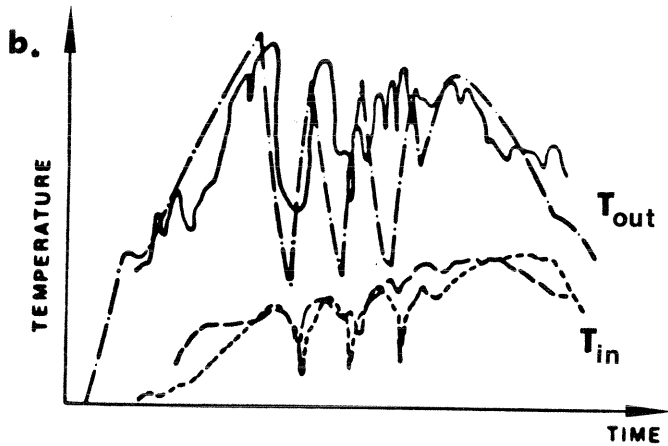


Figure D6

chauffe-eau solaire à Gevève

a) Schéma

b) Evolution mesurée et calculée



. température sortie capteur

—— mesure

- - - calcul

. température entrée capteur

—— mesure

- - - calcul

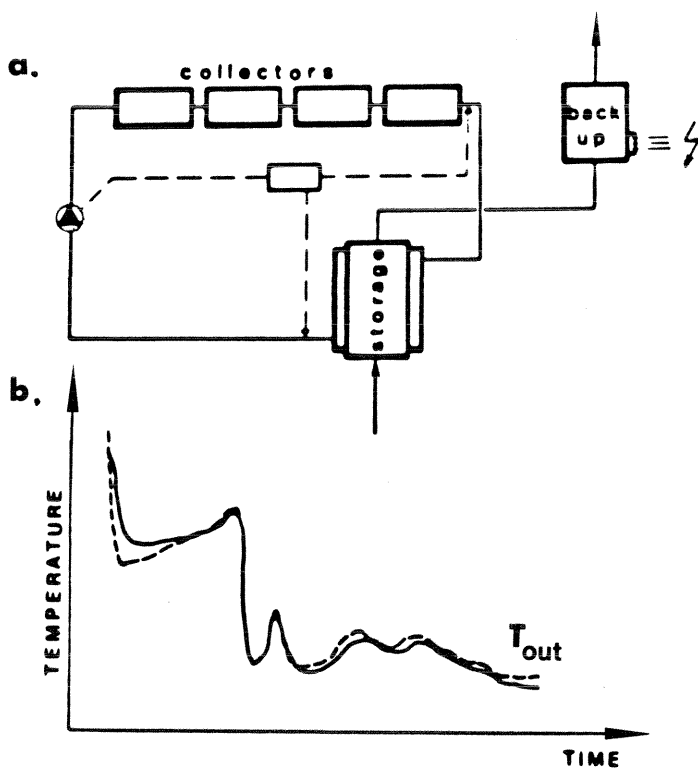


Figure D7

Chauffe-eau solaire à Lostorf

a) Schéma

b) Evolution mesurée et calculée

. température sortie capteur

—— mesure

- - - calcul

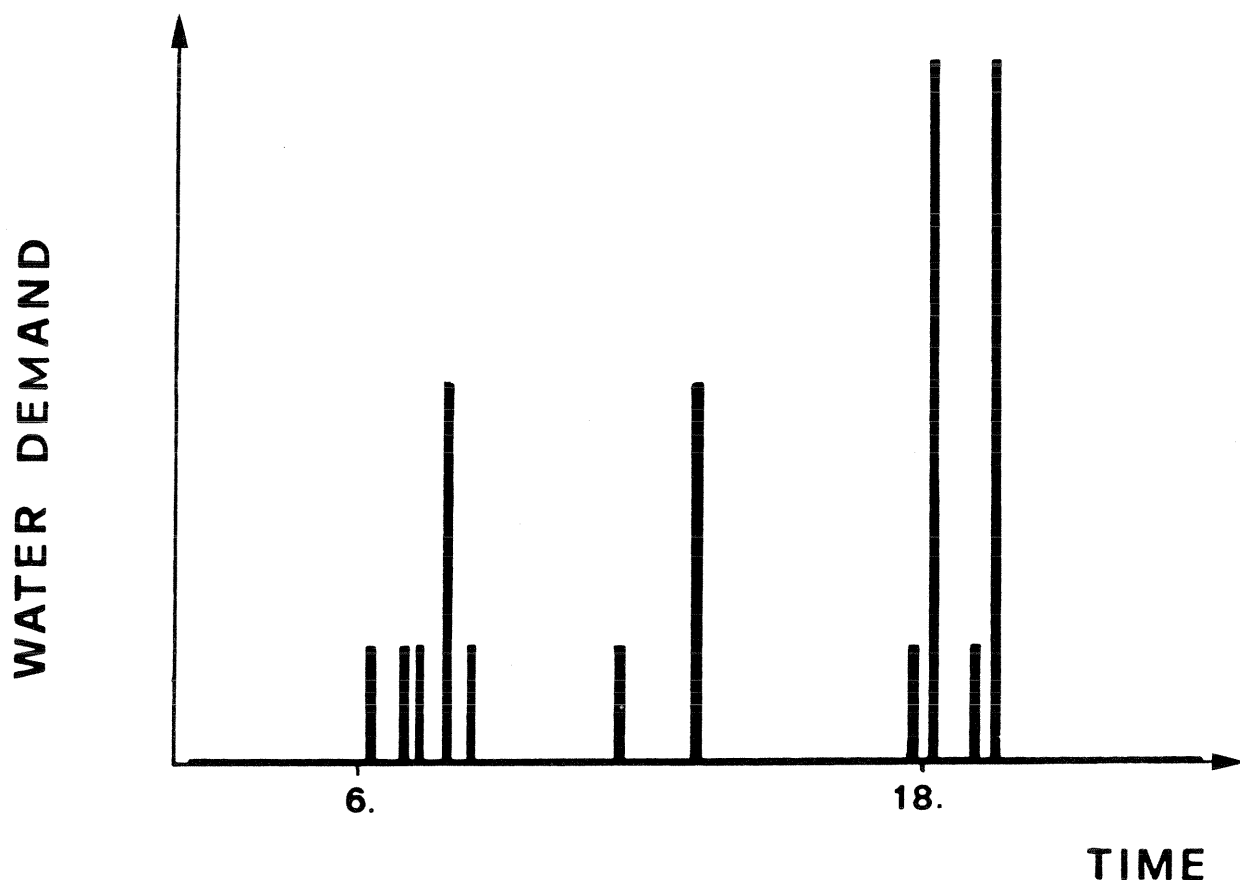


Figure D8 : Profil d'utilisation d'eau chaude type

2.2.3. Résultats

Pour mesurer la performance d'une installation solaire il convient de comparer l'énergie utile E délivrée par l'accumulateur (qui correspond à l'énergie captée par les collecteurs moins les pertes dans la tuyauterie et l'accumulateur) à l'énergie solaire S mise à disposition dans le plan des capteurs :

$$\text{Rendement } \eta = E / S$$

La qualité d'un collecteur s'exprime par sa caractéristique, indiquant son rendement qui malheureusement, est fortement variable avec l'intensité du rayonnement et la température de fonctionnement. Un exemple d'une telle caractéristique se trouve en figure D9 ; on peut réunir ce jeu de courbe en une bande très étroite en introduisant la variable combinée

$$X \equiv (T_c - T_e) / I$$

réunissant données météorologiques (température extérieure T_e et intensité du rayonnement I) et opérationnelles (température moyenne du fluide traversant le collecteur T_c).

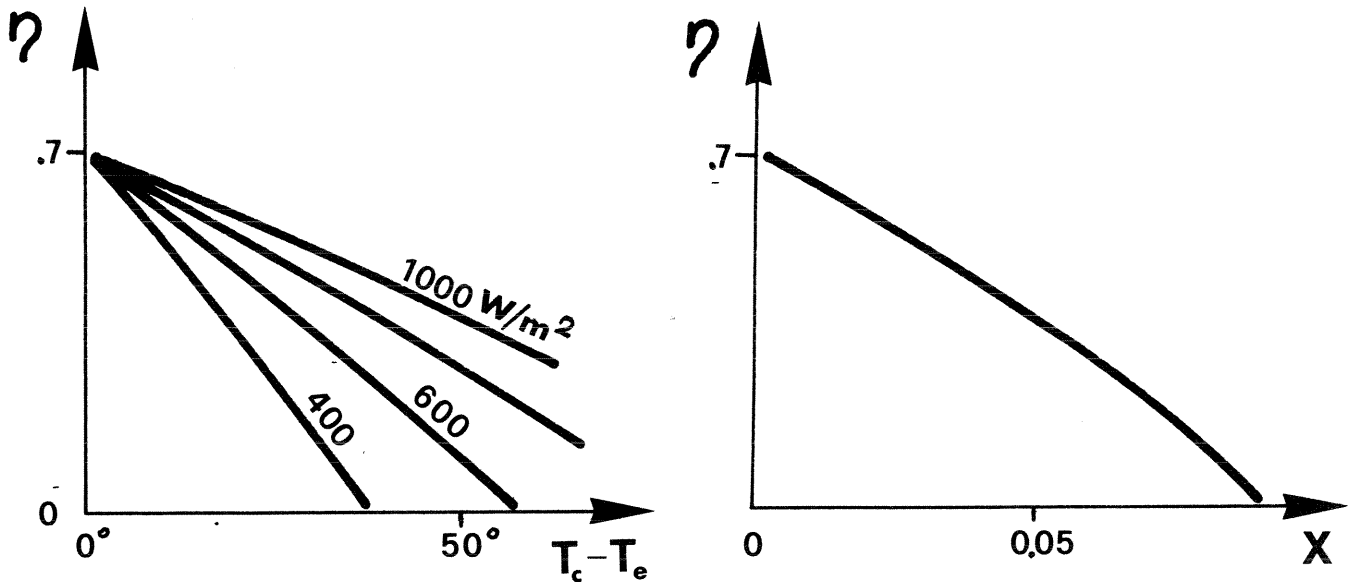


Figure D9 : Caractéristique d'un capteur solaire

Evidemment à chaque moment X varie, et lors d'un passage de nuages, X devient tellement grand que le rendement deviendrait négatif, c'est-à-dire le capteur fait perdre de la chaleur vers l'extérieur ; le système de régulation mettra la pompe hors fonction dans cette situation. Il existe donc un seuil minimum du rayonnement I_s).

Pour prédire la performance d'une installation solaire on ne dispose, pour la plupart des cas, que des valeurs moyennes (journalières, hebdomadaires) de l'offre S de l'énergie solaire. Si on connaissait une valeur moyenne correcte \bar{X} de la variable, on pourrait alors utiliser une caractéristique, du type de la figure D9, livrée par le fournisseur, pour évaluer le rendement moyen et par conséquent l'énergie utile.

Des méthodes sont connues qui tiennent compte du seuil de rayonnement mentionnées, basées sur des informations météorologiques types.

Nos travaux ont montré que cette première correction, si elle va certainement dans le bon sens, ne suffit pas. En effet la pompe n'est pas seulement mis hors service lorsque le rayonnement est trop bas, mais les inerties en jeu et les différentiels de régulation (différence de température

sortie collecteur / entrée collecteur, pour que la pompe se mette en marche) réduisent plus encore le temps de captage effectif ; ainsi l'offre solaire effective (prise en considération seulement pendant le fonctionnement) est inférieure à la valeur moyenne ou même à la valeur modifiée par la considération du seuil seul ; la différence peut représenter 10 - 30 %, selon la fréquence relative des nuages. La figure D10 illustre ce fait.

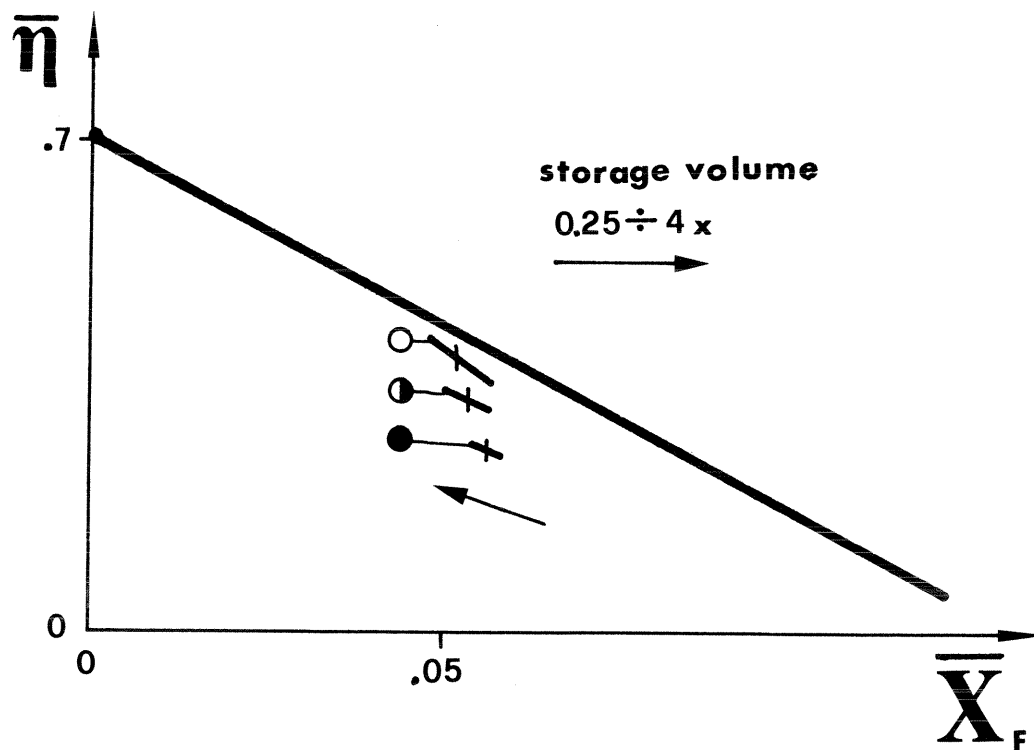


Figure D10 : Rendement journalier moyen pour : ○ temps clair
 ◐ temps nébuleux
 ● temps très nuageux
 —+— valeur standard

Influence du volume d'accumulation variée entre 0,25 et 4 fois la valeur standard.

Des études et calculs paramétriques étaient destinées à identifier les grandeurs décisives, qui dépendent :

- . du système de réglage (pompe marche seulement si la température sortie capteur est plus haute que la température en haut de l'accumulateur)
- . de la conception de l'accumulation de la chaleur
- . du décalage entre la durée d'utilisation et celle de captage.

Les paramètres les plus importants sont :

- . le rapport entre intervalle de temps nuageux et temps ensoleillé
- . le rapport entre temps caractéristique météorologique (levée - coucher du soleil, passage de nuages) et le temps caractéristique de stockage (temps pendant lequel le stock suffit pour alimenter l'utilisateur).

Il est donc nécessaire de tenir compte des effets transitoires dans le dimensionnement des installations, notamment si la performance lors des jours nuageux est importante, ce qui est souvent le cas, puisque lors de très beaux jours on a plutôt un excédent de chaleur ; en d'autres termes, il faut majorer la surface des capteurs par rapport à une considération quasi-stationnaire.

Sur la base de calculs non stationnaires faits par SSS - ITA, les figures D11 a - c contiennent l'influence de différentes variables, sur l'énergie utile récoltée par jour, en comparaison à une installation de référence (signe *).

Une seule grandeur a été variée à la fois :

- . surface des capteurs A
- . volume d'accumulateur V
- . inertie thermique des capteurs C .

La figure D11a donne notamment aussi une indication sur la baisse du gain marginal, en augmentant la surface A.

Dans le cadre de ces travaux, il a été nécessaire de concevoir et mettre en marche une station de mesures solarimétriques; complémentaire à celle décrit en 2.1.1., pouvant notamment distinguer entre lumière diffuse et directe, voir figure D12.

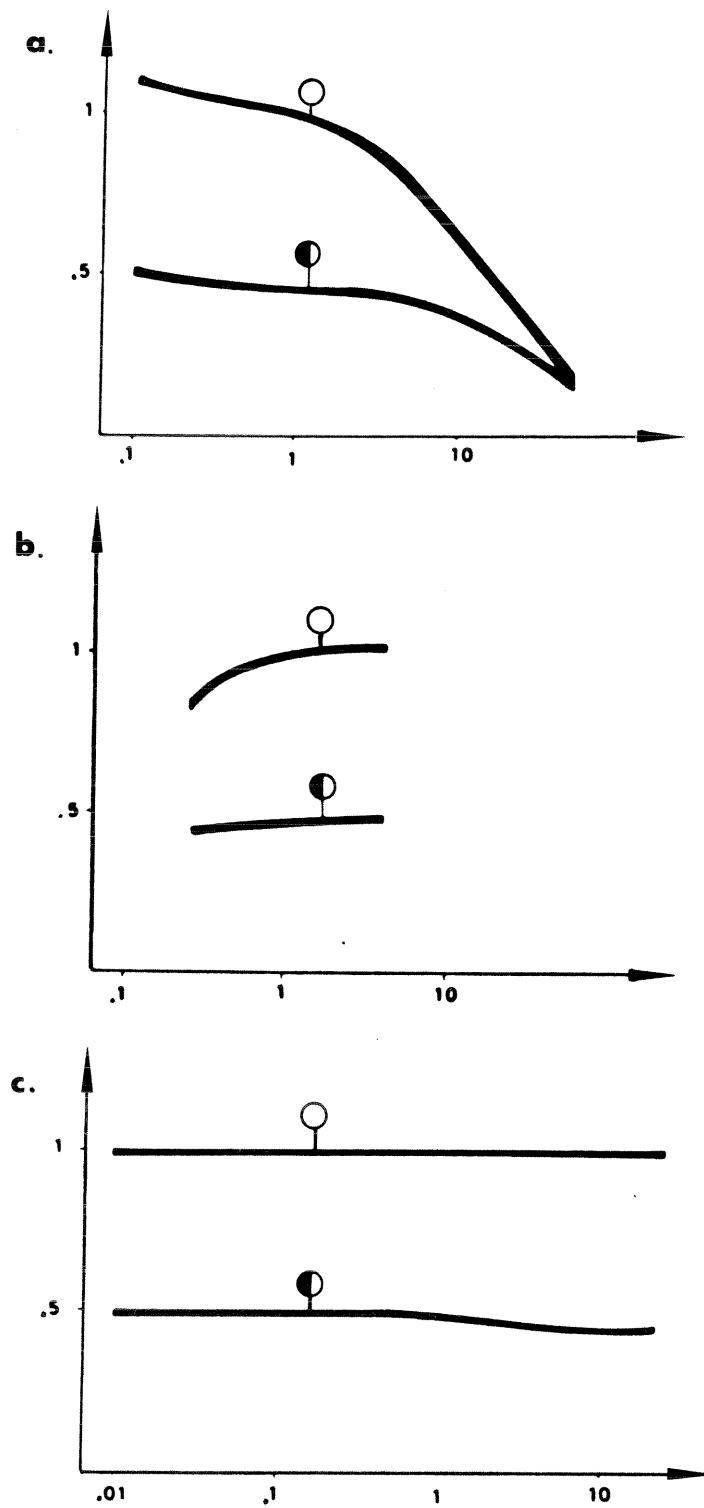


Figure D11 : Influence de différents paramètres de dimensionnement sur le gain journalier, comparé à une installation de référence (*),

○ beau jour

● jour nuageux

a) variation de la surface A

b) variation du volume d'accumulateur V

c) variation de l'inertie des capteurs C

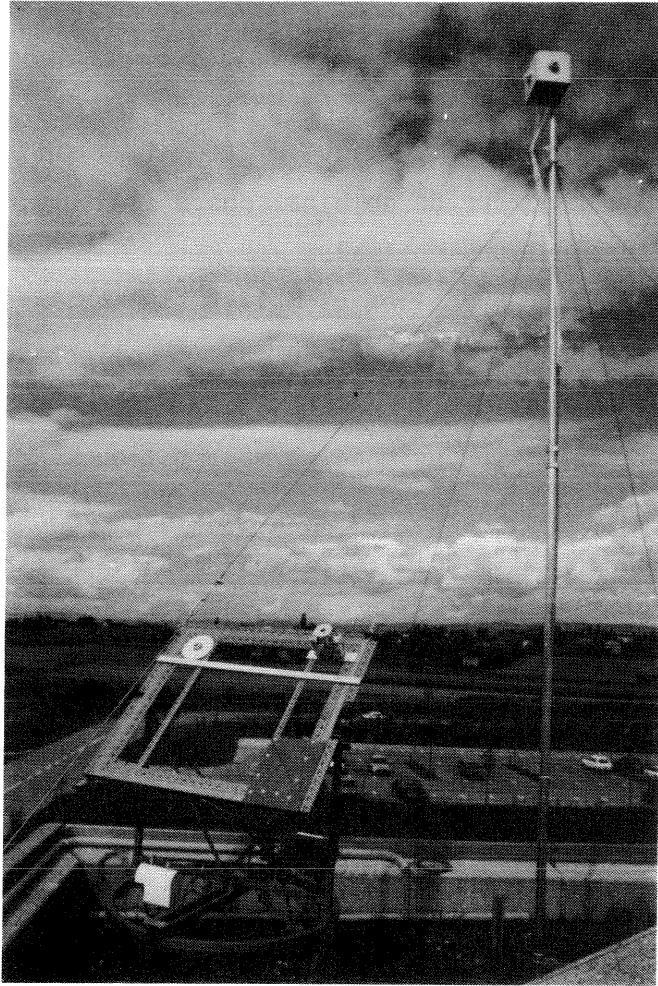


Figure D12 : Station solarimétrique à l'Institut de Thermique Appliquée de l'EPF-L.

2.2.4. Conclusions

- . Il est important d'inclure les effets non stationnaires dans l'évaluation de la performance de systèmes solaires. Ces effets tendent à diminuer le rendement, de sorte que la surface de capteurs nécessaire augmente, notamment par temps nuageux.
- . L'étude et la conception du système de régulation et d'accumulation joue un grand rôle. A prix d'installation égal, des variations de performance allant du simple au double sont possibles

2.3. Systèmes combinés solaire + pompe à chaleur

2.3.1. But de la recherche

Les instituts de Thermodynamique et de Thermique Appliquée ont réalisé en collaboration une installation expérimentale dans le but de faire avancer les connaissances dans le domaine de l'utilisation pratique de l'énergie

solaire, avec les objectifs suivants :

- . étude d'une conception thermodynamique et technique suffisamment élaborée pour couvrir un grand nombre de combinaisons d'éléments, en vue de déterminer la ou les combinaisons optimales
- . détermination du bilan énergétique global de l'installation
- . étude du comportement dynamique des éléments : collecteurs solaires, accumulateurs, pompe à chaleur
- . vérification de la validité des modèles mathématiques de simulation
- . étude de l'influence des paramètres technologiques (surfaces de captage, volumes de stockage, débits de circulation) sur les performances du système, en vue de son optimisation.

2.3.2. Installation expérimentale

Conception et réalisation de l'installation

L'installation a été conçue de façon à regrouper un nombre aussi élevé que possible d'éléments et de permettre de nombreuses combinaisons de fonctionnement. Elle assure le chauffage et la préparation d'eau chaude d'une maison familiale et elle est dotée d'un système de réglage très élaboré et d'un système complet de mesure avec enregistrement automatique. La figure D13 représente le schéma de principe de l'installation avec les principaux éléments tels que :

- . capteur solaire à haute température (KH)
- . capteur solaire à basse température (KB)
- . pompe à chaleur (TP)
- . source froide régénérable de la pompe à chaleur (AB)
- . accumulateurs de chaleur (AH1 et AH2)
- . chauffe-eau solaire (BK)
- . chauffe-eau chaudière (BC)
- . chaudière à mazout (C)
- . radiateur circuit de chauffage (R)

Les idées directrices qui ont été retenues pour cette installation sont :

- raccordement de l'installation d'essai à l'installation existante à mazout
- utilisation directe de l'énergie solaire obtenue à haute température pour réaliser par ordre de priorité les fonctions suivantes :

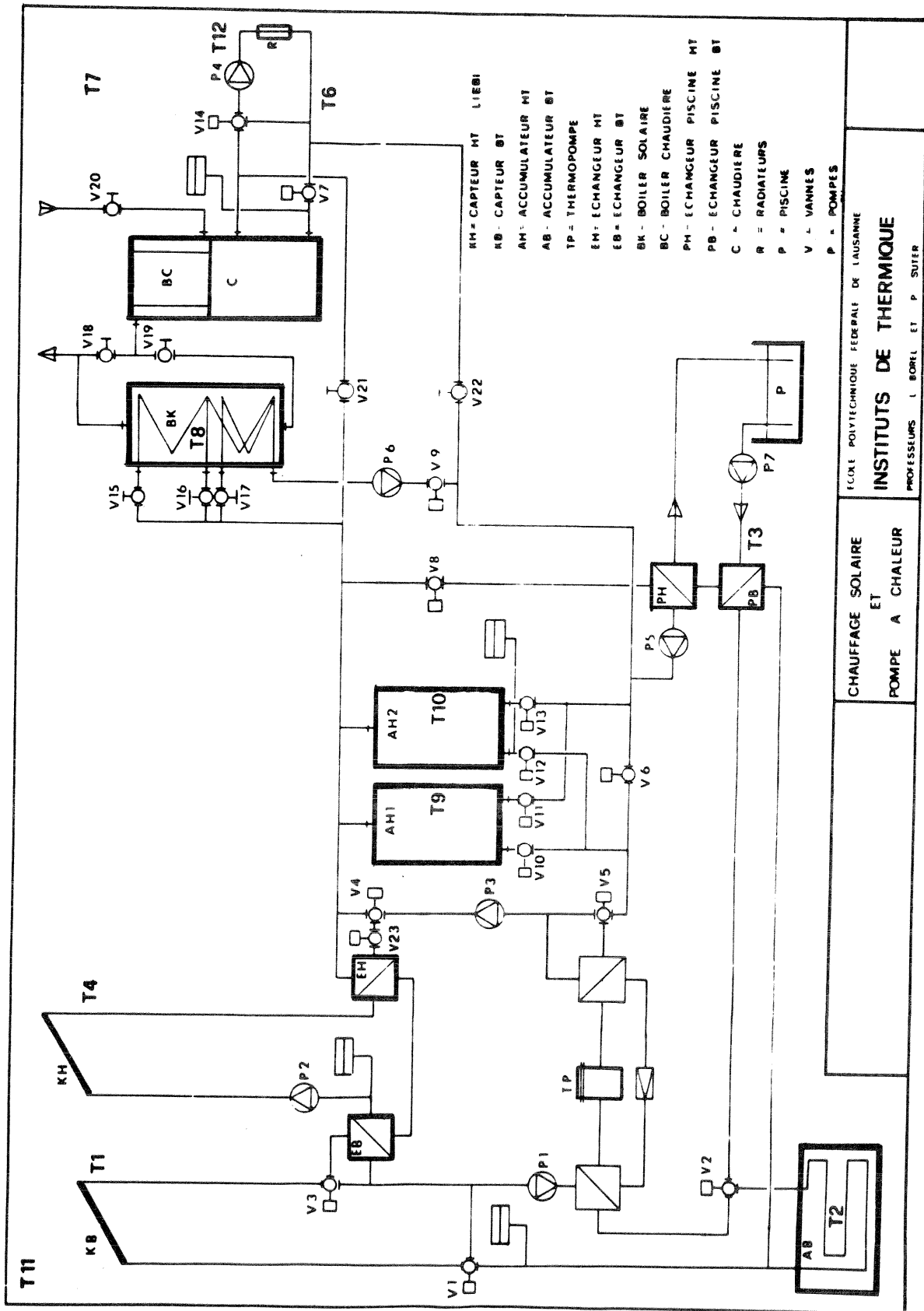


Figure D13 : Schéma de principe de l'installation.

- . préparation de l'eau chaude
- . chauffage de la maison
- élément choisi : capteur à concentration à miroirs cylindro-paraboliques disposés sur la toiture et suivant automatiquement le mouvement du soleil.
- utilisation indirecte de l'énergie solaire obtenue à basse température pour réaliser les fonctions suivantes :
 - . préparation de l'eau chaude
 - . chauffage de la maison
 - . chauffage de la piscine
- élément choisi : capteur plan (faisceau de tubes de polyéthylène) disposé sur la toiture.
- Stockage de l'énergie solaire sous forme sensible à différents niveaux de température
- élément choisi : accumulateurs à eau, calorifugés.
- stockage de l'énergie sous forme latente
- élément choisi : accumulateur à eau, enterré (ancienne citerne à mazout).
- réglage automatique de l'installation avec possibilité de réglage manuel.
- utilisation indépendante possible de l'installation classique de chauffage à mazout en cas de nécessité (pointes de demande et mise hors service de l'installation solaire).

La conception thermodynamique de l'ensemble est étudiée de façon à minimiser les pertes exergetiques, c'est-à-dire les irréversibilités. Il convient d'aiguiller l'énergie de telle sorte que les transferts-chaieurs s'effectuent avec des chutes de température aussi faibles que possible et que le stockage s'effectue à un niveau de température aussi élevé que possible.

Le couplage d'un système solaire et d'une pompe à chaleur permet d'une part d'élever le niveau de température de l'énergie solaire captée à basse température et d'autre part de créer une source froide artificielle et régénérable pour la pompe à chaleur.

Systèmes de mesure et de dépouillement

Le système de mesure est composé de capteurs et d'une chaîne d'acquisition de données. Les grandeurs mesurées sont les températures, les débits instantanés, l'intensité du rayonnement solaire, la vitesse et la direction du vent et l'énergie électrique consommée.

Les valeurs sont tout d'abord transcrites sur bandes perforées et simultanément reproduites sur une imprimante, puis stockées sur bandes magnétiques au Centre de Calcul de l'EPF-L, depuis le début des enregistrements réguliers (fin septembre 1976).

Bilans énergétiques

La figure D14 représente les bilans énergétiques annuels au niveau des différents utilisateurs ainsi que la répartition entre les différentes sources (voir figure D13) :

- . pour l'eau sanitaire, la pompe à chaleur TP assure pratiquement les trois-quart de l'énergie au niveau du boiler BK
- . pour les radiateurs R la pompe à chaleur ne couvre que les deux-cinquième des besoins. La part des capteurs à concentration KH étant relativement faible, c'est le mazout qui assure la majeure partie du chauffage
- . quant à la piscine P, la répartition est de trois-cinquième pour les capteurs plans KB et deux-cinquième pour KH et TP.

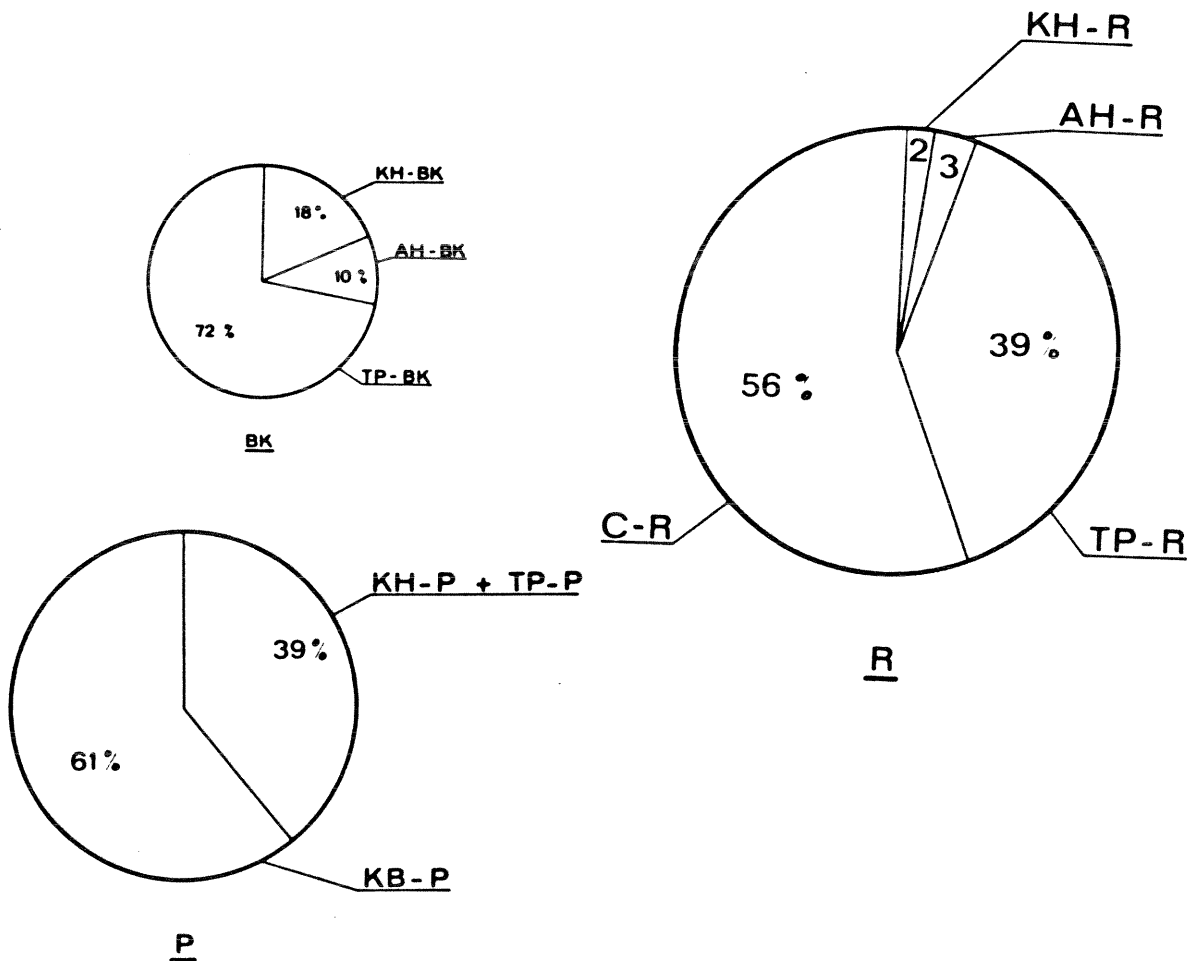


Figure D14 : Bilans énergétiques annuels du chauffe-eau solaire (BK), des radiateurs (R) et de la piscine (P).

2.3.3. Comportement de composantes

Capteurs solaires KH et KB

La figure D15 représente les bilans annuels :

- . des capteurs haute température KH . Le rendement annuel est de 40 % ce qui représente environ $360 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$. De ces 40 %, environ le dixième est transféré au circuit basse température. Le rendement peut être considéré comme satisfaisant bien qu'il soit rapporté à l'énergie incidente directe et non totale.
- . des capteurs basse température KB . Le rendement annuel est d'environ 20 % soit à peu près $200 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$. Etant donné qu'il s'agit d'un capteur plan, le rendement est rapporté à l'énergie incidente totale. Pour sa simplicité, ce type de capteur fonctionne avec un rendement acceptable, mais n'oublions pas que son niveau de température est très bas, l'énergie collectée ne pouvant être utilisée que par l'intermédiaire de la pompe à chaleur ou, directement, par la piscine. Enfin, si les trois-quarts de l'énergie fournie proviennent des rayons solaires, un quart est absorbé à l'environnement, le capteur fonctionnant alors comme échangeur.

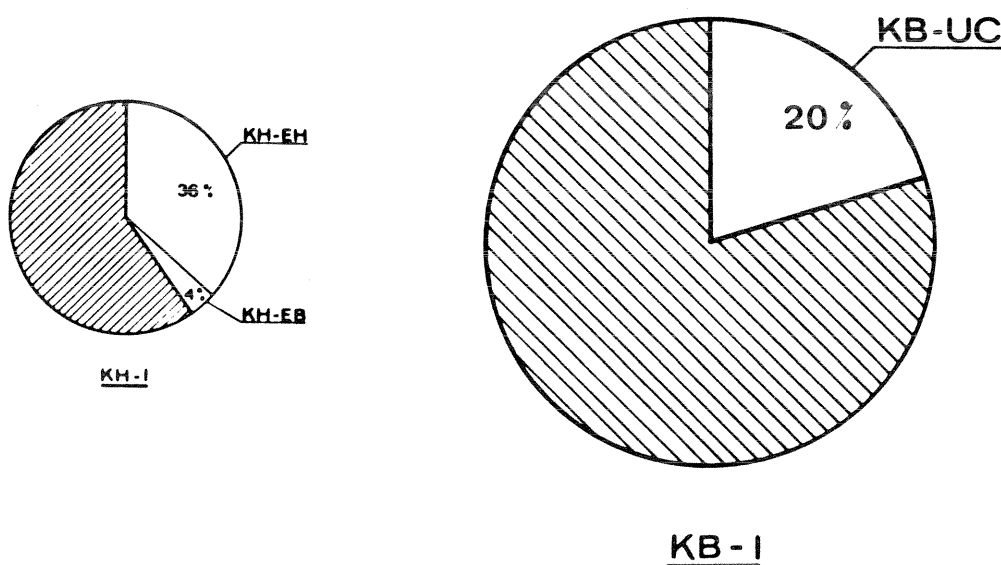


Figure D15 : Bilans énergétiques annuels des capteurs.

La caractéristique d'un capteur solaire est généralement présentée sous la forme d'un graphique "rendement/différence de température normalisée". Cette différence de température normalisée a pour expression :

$$\Delta T_N = \frac{\frac{T_{fi} + T_{fo}}{2} - T_a}{I}$$

- où T_{fi} : température du fluide à l'entrée du capteur
 T_{fo} : température du fluide à la sortie du capteur
 T_a : température de l'air ambiant
 I : rayonnement total incident pour un capteur plan
rayonnement direct incident pour un capteur à concentration [W/m^2].

A partir des données mesurées, les droites caractéristiques des capteurs KH et KB, calculées par la méthode des moindres carrés, ont pu être tracées (figures D16).

Les équations des caractéristiques des capteurs sont données par :

$$\text{RENDMENT} = 0.73 - 3.35 * \Delta T_N \quad \text{pour KH}$$

$$\text{RENDMENT} = 0.31 - 10.2 * \Delta T_N \quad \text{pour KB}$$

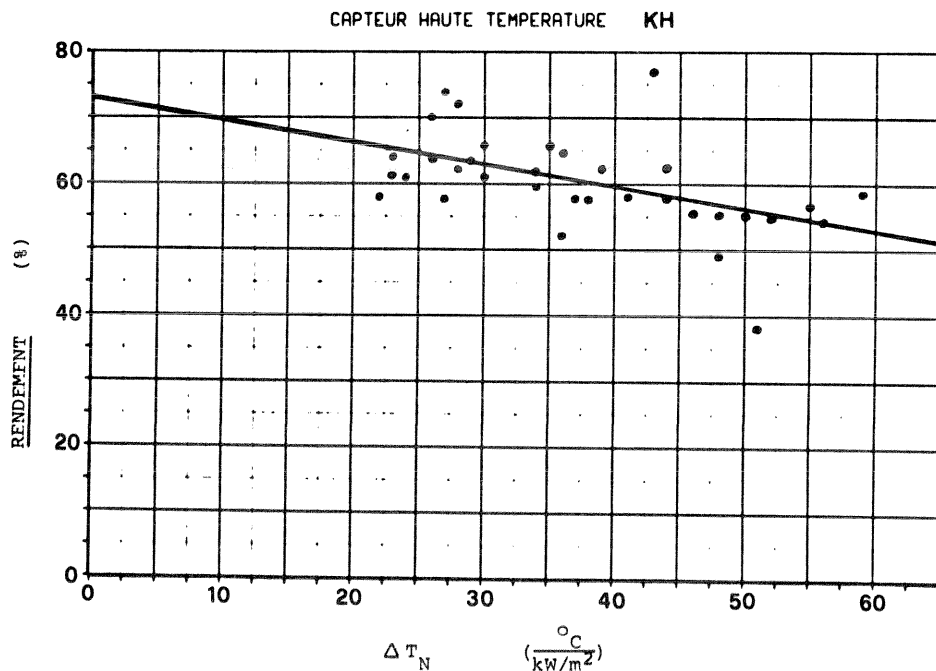


Figure D16 a : Caractéristique du capteur à concentration KH.

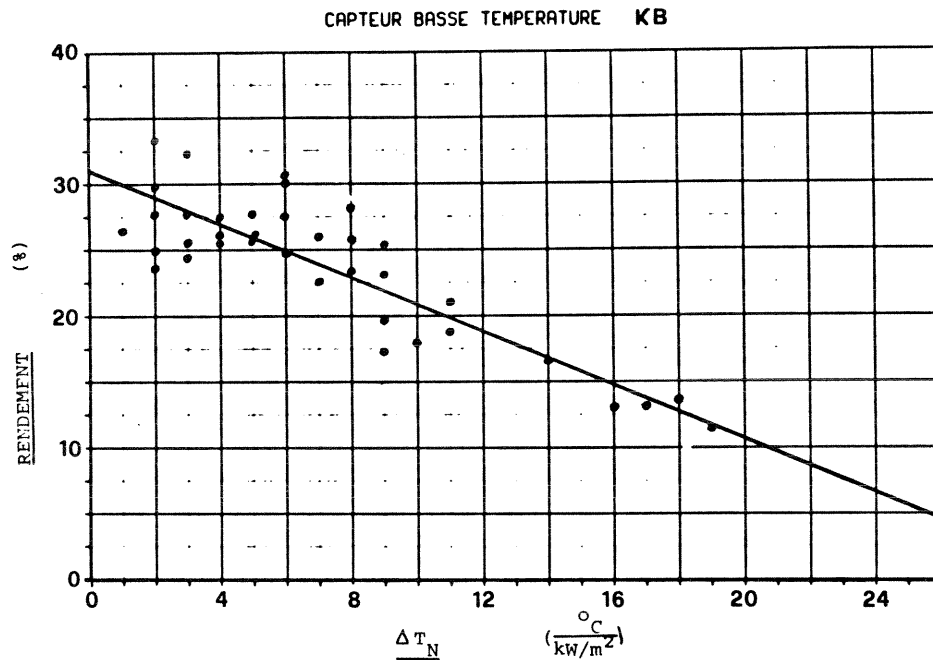


Figure D16b : Caractéristique du capteur plan KB .

Accumulateurs de chaleur AH1 et AH2

Le profil de température dans les accumulateurs joue un rôle important pour la performance de tout capteur solaire, puisque celui-ci, alimenté normalement du bas d'accumulateur, a un rendement fortement variable en fonction de la température d'entrée.

La figure D17 illustre un exemple de stratification à l'intérieur de l'accumulateur AH1 pour une journée type (4 septembre 78). De 13h20 à 18h, l'énergie disponible est stockée - figure inférieure - puis à deux reprises, à 18h20 et 20h, elle est soutirée et dirigée vers BK . Plusieurs sondes de température ont été placées verticalement dans AH1, il est donc possible de suivre l'évolution de température des différentes couches au cours du temps.

Sur la figure supérieure, T16 représente la température de la couche d'eau supérieure et T21 la température de la couche inférieure. Jusqu'à 13h les températures baissent régulièrement sous l'effet des pertes thermiques. Notons qu'il existe à 0h une stratification très nette due à la journée précédente et que cette stratification diminue au cours de la matinée. De 13h20 à 18h le niveau de température de l'ensemble de l'accumulateur augmente régulièrement et sans stratification (accumulateur à mélange). Le

premier soutirage produit une chute de température pour les couches inférieures (T20 - T21) et n'altère pas les autres couches. Le deuxième soutirage produit une baisse de température des couches moyennes (T17 - T18) sans altérer la couche supérieure (T16).

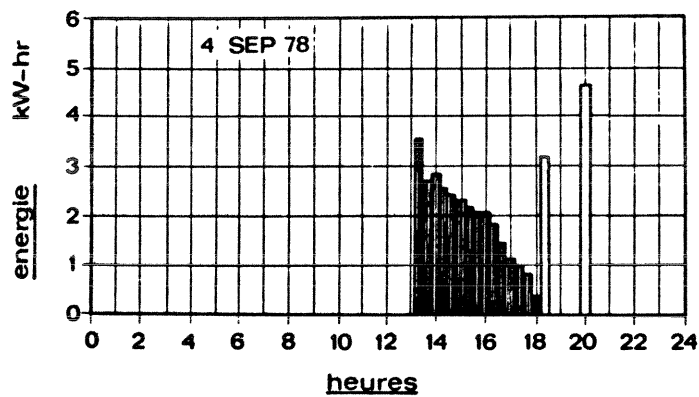
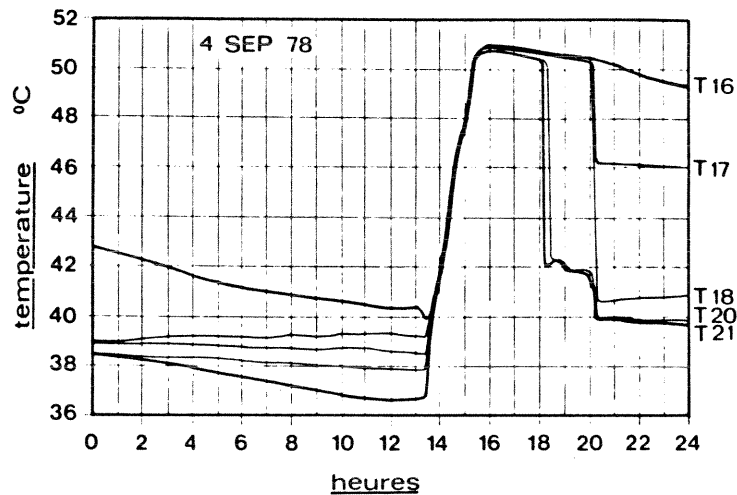


Figure D17 : Accumulateur AH1.

2.3.4. Performance de la thermopompe dans l'installation combinée d'Epalinges

Dans les installations réelles, les pompes à chaleur sont soumises à des régimes fort variables. Le but de ce travail était tout d'abord de le

comparer à la performance en régime permanent et ensuite d'identifier les améliorations possibles.

Efficacité et rendement énergétique en régime permanent (essais en laboratoire)

La figure D18 donne un extrait de quelques valeurs, mesurées en fonction des températures aux sources chaude et froide :

- efficacité de la PAC :

$$\epsilon = \frac{\dot{W}_h^-}{\dot{E}^+}$$

avec :

\dot{W}_h^- = puissance-transformation fournie à la source chaude

$$\text{avec } \dot{W}_h^- = \dot{M}_h (h_{hs} - h_{he})$$

\dot{E}^+ = puissance électrique reçue

\dot{M} = débit-masse

h = enthalpie

- rendement exergetique η_x pour la température atmosphérique T_a , mesurée en cours d'essai, ainsi que pour d'autres valeurs de T_a :

$$\eta_x = \frac{\dot{E}_{wh}^-}{\dot{E}^+ + \dot{E}_{wk}^+} \quad \text{lorsque } \dot{E}_{wk}^+ > 0, \text{ et}$$

$$\eta_x = \frac{\dot{E}_{wh}^- + \dot{E}_{wk}^-}{\dot{E}^+} \quad \text{lorsque } \dot{E}_{wk}^+ < 0$$

avec :

\dot{E}^+ = puissance électrique absorbée

\dot{E}_{wh}^- = copuissance-transformation fournie à la source chaude

$$\dot{E}_{wh}^- = \dot{M}_h (k_{hs} - k_{he})$$

\dot{E}_{wk}^+ = copuissance-transformation reçue de la source froide

$$\dot{E}_{wk}^+ = \dot{M}_k (k_{ke} - k_{ks})$$

\dot{M} = débit-masse

k = coenthalpie ($k = h - T_a \cdot s$)

T_{ke} = température de l'eau à l'entrée de l'évaporateur

T_{ks} = température de l'eau à la sortie de l'évaporateur

T_{he} = température de l'eau à l'entrée du condenseur

T_{hs} = température de l'eau à la sortie du condenseur

N°	T _a C	T _{ke} C	T _{ks} C	T _{we} C	T _{ws} C	E ⁺ kW	W _w ⁻ kW	ε	E _w ⁻ kW	η _x
1	17,5	23,7	14,8	34,0	42,8	5,10	19,8	3,87	1,33	0,24
2	15,0	19,0	11,2	34,0	41,8	4,82	17,6	3,64	1,29	0,27
3	13,5	16,5	9,4	33,9	41,6	4,70	17,3	3,67	1,35	0,28
4	12,0	14,2	7,4	33,9	41,2	4,57	16,5	3,60	1,35	0,29
5	10,0	11,9	5,4	34,1	40,9	4,44	15,1	3,40	1,34	0,30
6	9,5	9,5	3,4	34,1	40,9	4,44	15,1	3,40	1,36	0,30
7	8,0	7,1	1,5	34,1	40,2	4,15	13,7	3,31	1,31	0,30
8	6,5	4,8	- 0,6	34,1	39,9	4,01	12,9	3,22	1,27	0,31
9	5,0	2,4	- 2,6	34,1	39,6	3,92	12,5	3,17	1,25	0,31
10	3,0	0,0	- 4,5	34,3	39,3	3,74	11,3	3,01	1,23	0,31
11	1,5	- 2,1	- 6,3	34,4	39,0	3,60	10,4	2,90	1,19	0,31

Figure D18 : Epalinges - Thermopompe (eau/eau) - Valeurs en régime permanent.

Pour les définitions, voir texte.

Les différents numéros correspondent à différents régimes.

Efficacité et rendement en régime réel (essais Epalinges)

La figure D19 donne les valeurs, calculées sur une durée d'un mois et d'un an.

- de l'efficacité :

$$\varepsilon = \frac{\sum W_h^-}{\sum E^+}$$

- et du rendement exergetique :

$$\eta_X = \frac{\sum E_{wh}^- + \sum E_{wk}^-}{\sum E^+ + \sum E_{wk}^+}$$

où :

W_h^- = énergie-transformation fournie à la source chaude

$$W_h^- = M (h_{hs} - h_{he})$$

E^+ = énergie électrique reçue

E_{wh}^- = exergie-transformation fournie à la source chaude

$$E_{wh}^- = M (k_{hs} - k_{he})$$

W_{wk}^- = exergie-transformation fournie à la source froide lorsque la température moyenne \bar{T}_k de la source froide est inférieure à la température T_a de l'atmosphère

E_{wk}^+ = exergie-transformation E_{wk}^+ lorsque la température moyenne \bar{T}_k de la source froide est supérieure à la température T_a de l'atmosphère

Le signe Σ indique que les énergies ont été intégrées sur une période d'un mois.

- des températures :

T_{ke} = température de l'eau à l'entrée de l'évaporateur

T_{ks} = température de l'eau à la sortie de l'évaporateur

T_{he} = température de l'eau à l'entrée du condenseur

T_{hs} = température de l'eau à la sortie du condenseur

- de la durée de fonctionnement de la thermopompe pendant chaque mois

Année	Mois	T _{ke} C	T _{ks} C	T _{we} C	T _{ws} C	E ⁺ kWh	W _w ⁻ kWh	ε	E _{ww} ⁻ kWh	η _x	Durée de fonctionnement en heures
1977	1	- 1,9	- 5,8	31,7	36,3	517	1526	2,95	175	0,34	149
	2	1,4	- 3,0	34,8	39,9	1183	3681	3,11	425	0,36	320
	3	3,6	- 0,8	33,8	40,1	1375	4167	3,03	453	0,33	355
	4	2,9	- 1,3	34,9	39,6	957	2976	3,11	331	0,35	267
	5	7,2	2,8	35,5	40,4	874	2469	2,83	254	0,29	210
	6	15,0	10,5	36,6	41,2	200	471	2,35	42	0,21	42
	7	21,8	18,6	40,0	42,5	98	156	1,59	16	0,16	24
	8	19,5	17,3	39,7	41,9	104	158	1,52	18	0,17	29
	9	9,7	6,0	35,7	40,6	431	1222	2,83	130	0,30	104
	10	9,3	5,0	34,9	40,3	815	2454	3,01	244	0,30	189
	11	4,0	0,0	35,5	41,0	720	2352	3,27	262	0,36	179
	12	0,2	- 3,9	34,4	39,1	845	2563	3,03	300	0,35	231
Moyenne/Total		5,1	1,0	35,0	40,0	8119	24195	2,98	2650	0,33	2099
1978	1	0,4	- 3,4	31,3	35,6	242	557	2,30	62	0,26	56
	2	0,3	- 3,7	32,3	37,4	718	2174	3,03	235	0,33	203
	3	3,3	- 1,0	33,2	38,9	423	1457	3,44	156	0,37	124
	4	5,1	1,2	33,2	38,3	1040	3075	2,96	314	0,30	295
	5	6,9	2,7	32,0	37,7	837	2770	3,31	262	0,31	227
	6	18,6	16,1	35,2	38,7	200	674	3,37	58	0,28	84
	7	14,0	10,5	33,3	39,1	175	484	2,76	42	0,24	42
	8	17,0	13,2	34,8	40,8	147	430	2,93	37	0,25	36
	9	14,2	9,8	34,5	40,6	228	660	2,89	62	0,27	51
	10	6,9	3,1	33,1	38,7	810	2097	2,59	211	0,26	168
	11	1,4	- 2,4	33,1	37,8	1288	3986	3,10	444	0,34	367
	12	1,3	- 2,9	29,9	35,2	616	2134	3,47	227	0,37	187
Moyenne/Total		4,9	1,0	32,7	37,9	6724	20498	3,03	2110	0,31	1840
Moyenne des 2 ans		5,0	1,0	34,0	39,0	7422	22437	3,00	2380	0,32	1970

Remarque : η_x a été calculé avec T_a = température atmosphérique du lieu au moment de la mesure
Pour les définitions, voir texte.

Figure D19 : Epalinges - Thermopompe (eau/eau) - Valeurs en régime réel - Moyennes mensuelles.

Ce tableau permet de voir l'évolution de l'efficacité et du rendement exergetique pour les différents mois de l'année. Ils sont plus faibles pendant 3 à 4 mois, en été, bien que la température de la source froide soit très élevée en moyenne. Cela provient du fonctionnement intermittent de la PAC, dont on constate que le nombre d'heures de fonctionnement mensuel est très faible (de 24 à 84 heures/mois).

Pendant les autres mois, l'efficacité et le rendement exergetique sont plus hauts, alors que la température de la source froide s'abaisse rapidement autour de +7 à -2 °C.

2.4. Machines thermiques solaire à absorption directe du rayonnement

2.4.1. Idée de base

Les machines solaires peuvent constituer une application importante future ; elles utilisent un fluide caloporteur à haute température (plus de 400°C) liquide ou gazeux. Son échauffement nécessite une concentration du rayonnement solaire de l'ordre de grandeur de 1000. Tous les dispositifs testés jusqu'à ce jour contiennent une surface très absorbante chauffée par l'ensoleillement, transférant ensuite la chaleur au fluide caloporteur. Si ce dernier est une vapeur ou un gaz, le transfert relativement mauvais conduit à des surtempératures considérables de la surface absorbante qui cause des problèmes de résistance des matériaux. De plus le parcours du fluide le long de cette surface doit être suffisamment long, et donc le temps d'échauffement est long.

Nous avons étudié, par théorie et par expérience, un principe différent : le rayonnement, traversant une paroi transparente, est absorbé directement dans le fluide caloporteur, qui doit donc être absorbant pour les courtes longueurs d'onde. De cette façon la température des parois reste plus froide et le temps d'échauffement est extrêmement court, voir fig. D20.

Comme fluide absorbeur, une suspension de fines particules dans un gaz inerte a été choisie.

L'absorption désirée dépend :

- . du diamètre des particules, qui doit être de l'ordre de grandeur du μm
- . des indices de réfraction des particules
- . de la concentration des particules
- . de la profondeur.

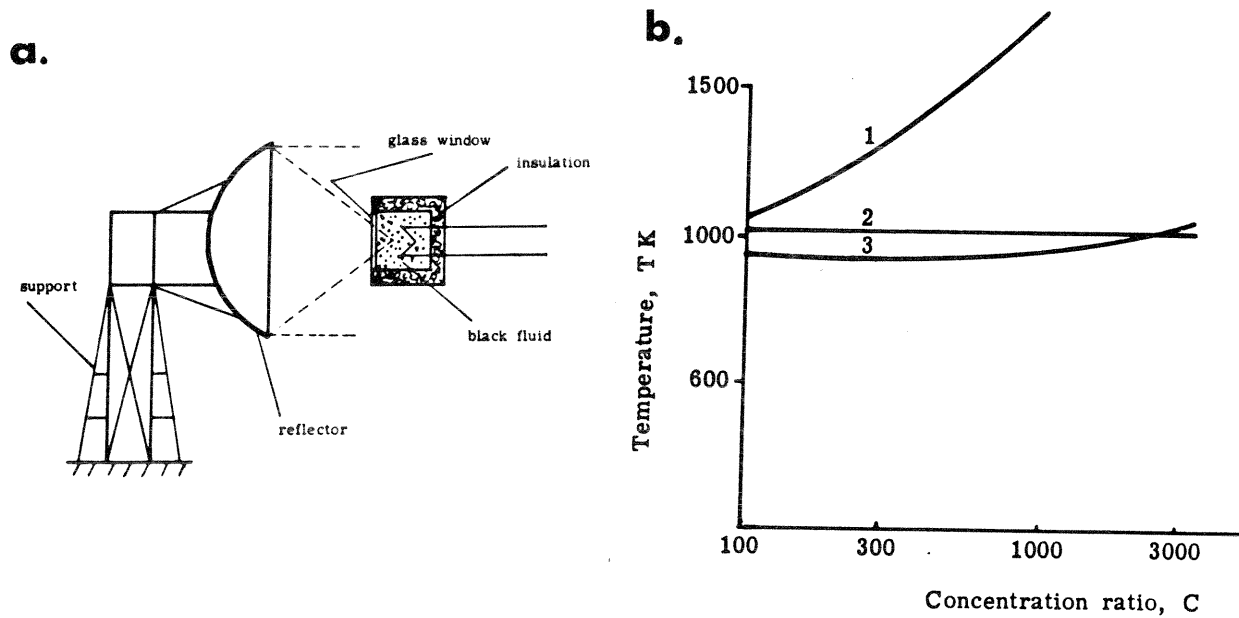


Figure D20 : a) Principe de l'absorption du rayonnement solaire dans un fluide, après passage à travers d'une paroi transparente
 b) Température de la paroi en fonction de la concentration
 1 : capteur conventionnel ; 3 : capteur à absorption dans le fluide ; 2 : température du fluide (égale pour les deux cas 1 et 3).

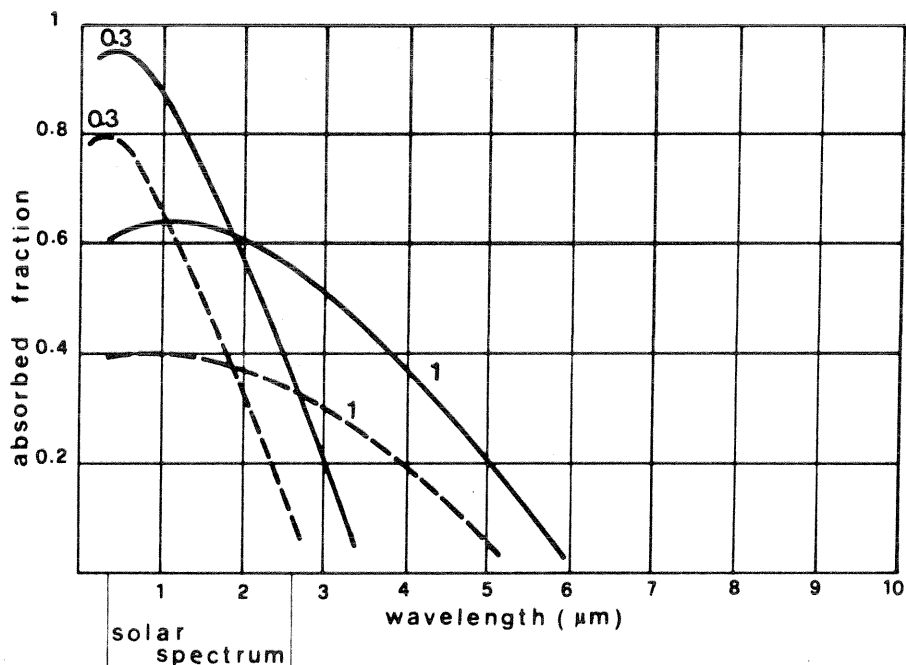


Figure D21 : Caractère sélectif du coefficient d'absorption (et d'émission) d'une suspension avec des particules de graphite de 0,3 et 1 μm .

————— épaisseur 1 cm - - - - - épaisseur 0,5 cm

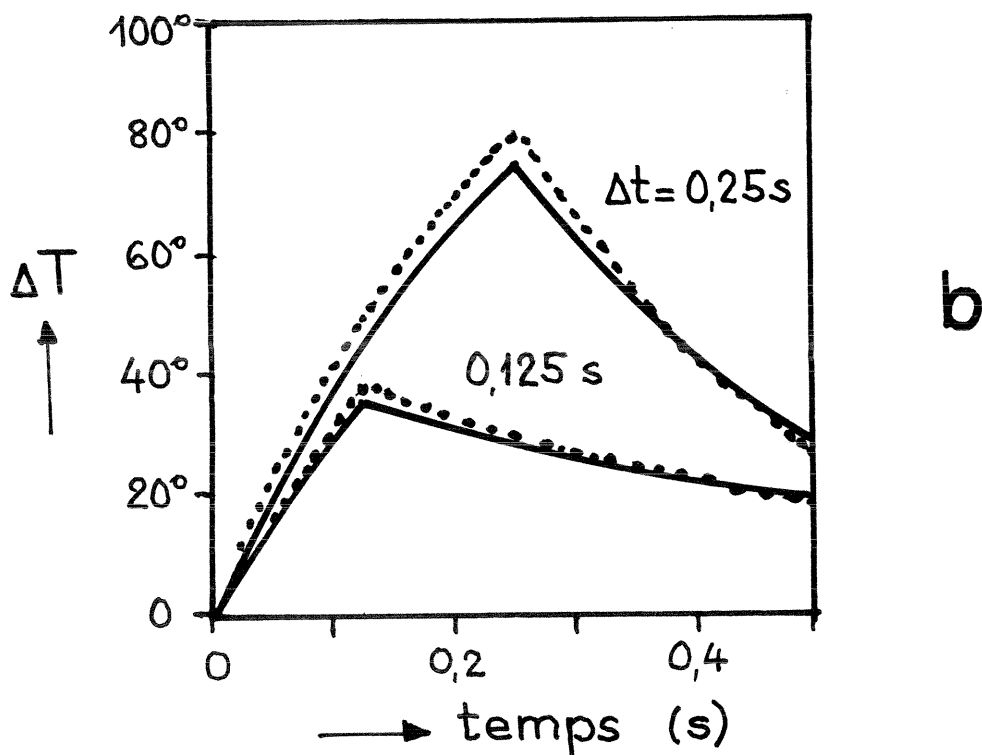
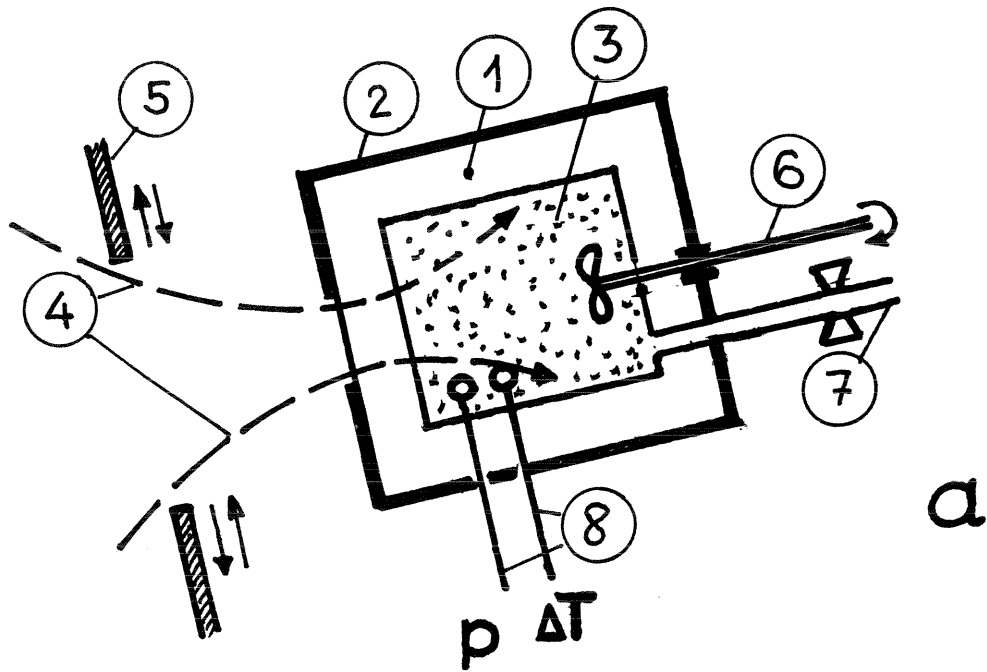


Figure D22 : Essais d'absorption dans chambre à quartz d'un rayonnement fortement concentré, admis pendant un court laps de temps Δt .

- 1 Enceinte en quartz 2 Argent 3 Suspension 4 Faisceau solaire
5 Ouverture programmée 6 Agitateur 7 Raccordement 8 Mesures

a) Schéma

b) Evolution de la température pour deux valeurs Δt .

— calcul avec effet de la paroi ---- mesures

2.4.2. Le comportement de suspensions

Des études théoriques ont montré que des particules de graphite en suspension dans l'azote possèdent les propriétés requises, de sorte que les caractéristiques suivantes résultent :

- . des couches de quelques cm de profondeur absorbent plus de 80 % du rayonnement avec des contenus massiques en particules de l'ordre du %. Ainsi l'écoulement du gaz n'est pas dérangé
- . une telle suspension est sélective, c'est-à-dire qu'elle absorbe bien le rayonnement solaire, tandis qu'elle n'émet que peu de rayonnement infra-rouge ; ce fait est évidemment très avantageux pour réaliser un bon rendement de captation, voir figure D21
- . il n'y a pas de problèmes de toxicité ou de corrosion.

Ces résultats ont été vérifiés dans une chambre d'absorption exposée pendant les courts laps de temps au rayonnement concentré (facteur 2500) par un miroir parabolique avec guidage automatique. Dans la chambre en quartz argenté (sauf une fenêtre), remplie de la suspension azote-graphite, la température et la pression augmentent au fur et à mesure du rayonnement absorbé, voir figure D22.

Ces expériences ont nécessité le développement d'instruments auxiliaires permettant la mesure de l'intensité dans des rayonnements fortement concentrés ; mentionnons un radiomètre selon le principe de la cavité absorbante avec une couverture de 1 mm permettant des mesures relatives, et un calorimètre servant à l'étalonnage du radiomètre. A cause des hauts flux le refroidissement des sondes doit être bien étudié. La technique acquise a pu être utilisée dans la construction d'instruments pour des expériences semblables à l'EIR, voir figure D23.

A côté des propriétés avantageuses il existe évidemment aussi des problèmes :

- . la suspension doit être suffisamment uniforme ; ceci dépend évidemment surtout de la géométrie, de l'écoulement et de la manière d'injecter les particules
- . puisque le diamètre des particules est crucial pour l'absorption, l'agglomération éventuelle conduisant à des diamètres élevés et à une absorption réduite doit être évitée
- . le dépôt des particules sur les parois aurait 2 effets néfastes, puisqu'elle réduirait la concentration et rendrait les fenêtres (destinées à l'entrée du rayonnement) opaques.

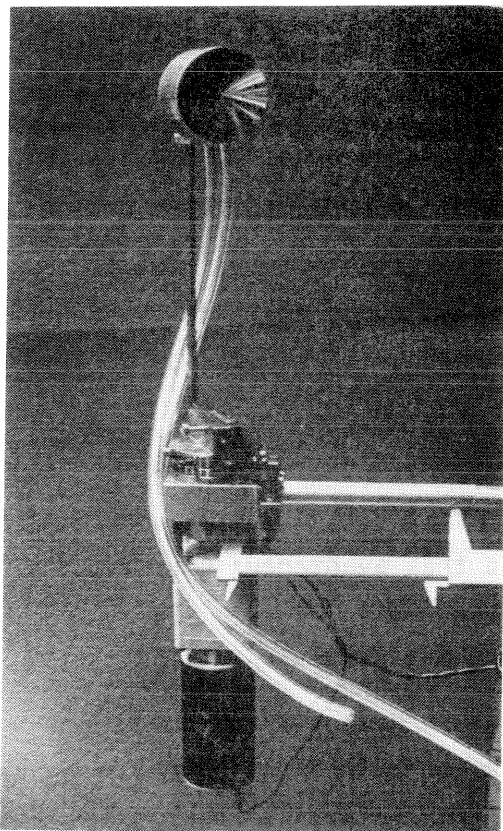


Figure D23 : Photo du radiomètre construit pour l'utilisation dans un rayonnement fortement concentré.

Pour ces raisons, une étude approfondie théorique et expérimentale concernait ces deux phénomènes.

Dans la partie théorique, l'évolution en fonction du temps d'une suspension polydisperse (donc avec une distribution statistique des diamètres) dans un écoulement était traitée par un modèle mathématique sur ordinateur, en tenant compte de l'agglomération et de la déposition sous l'influence simultanée de la gravitation, du mouvement brownien et de la turbulence. Pour la déposition, les conditions spéciales d'adhésion et de ré-entraînement ont été introduites.

Les résultats théoriques ont ensuite été vérifiés dans une boucle expérimentale spéciale et nouvelle, permettant la création, circulation et observation d'une telle suspension pendant des durées choisies et dans des conditions de température et pression variables. Le prélèvement d'échantillons représentatifs était un problème particulier, facilité par des travaux antérieurs à l'institut, voir figure D24.

Il y a une bonne conformité entre la théorie et les essais ; au fur et à mesure que l'évolution de la suspension continue dans le temps, la théorie s'avère plutôt pessimiste.

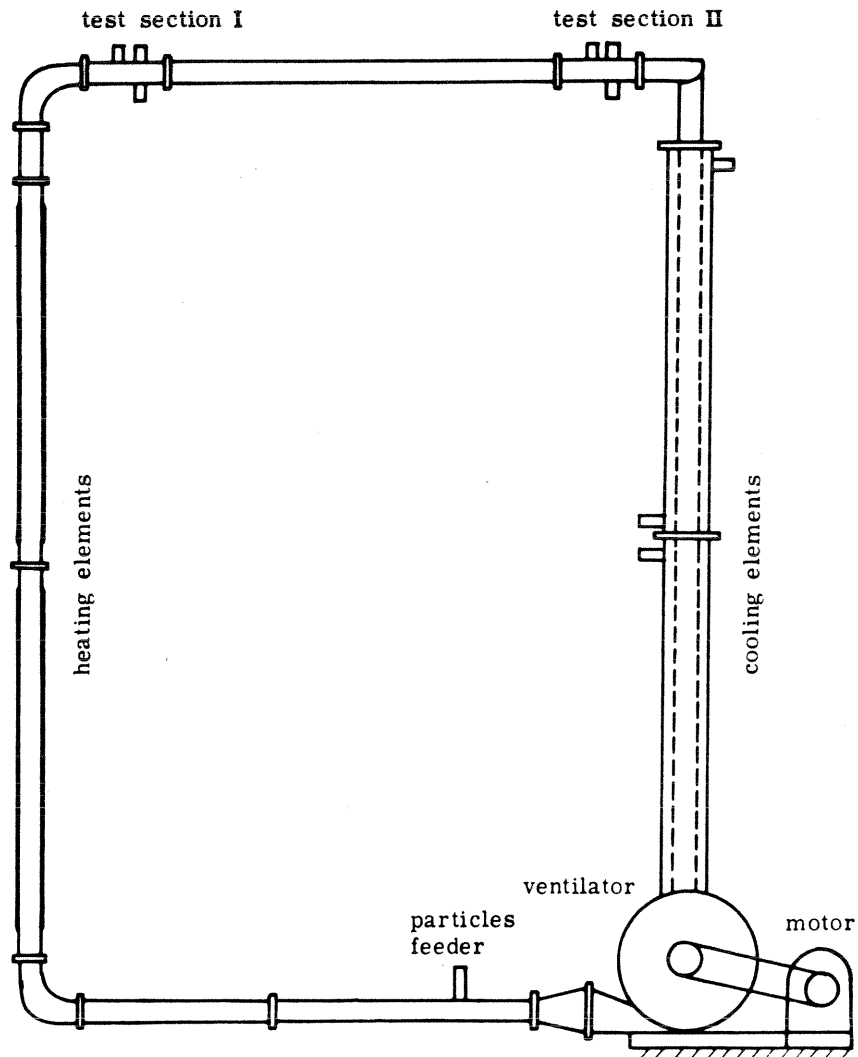


Figure D24 : Schéma de la boucle d'essais pour le dépôt et l'agglomération de suspensions en mouvement (pression jusqu'à 6 bar, température jusqu'à 200°C, diamètre intérieur des tubes 50 mm).

Pour des hautes concentrations initiales, le dépôt et l'agglomération provoquent une forte diminution de la concentration dans un temps très court (quelques minutes). Pour les suspensions à basse concentration initiale, mais optiquement intéressante, la diminution est moins rapide (quelques heures), mais néanmoins beaucoup plus prononcée pour une utilisation technique dans un processus permanent.

Les essais ont montré ensuite, que l'agglomération et le dépôt peuvent être réduits de plusieurs ordres de grandeur en revêtant les particules d'une couche très mince d'un produit chimique à base de silicone. Dans ce cas, il est possible d'utiliser une telle suspension pour l'absorption directe de l'énergie solaire concentrée dans un temps raisonnablement long, pourvu que le niveau de température requis soit compatible avec cette substance.

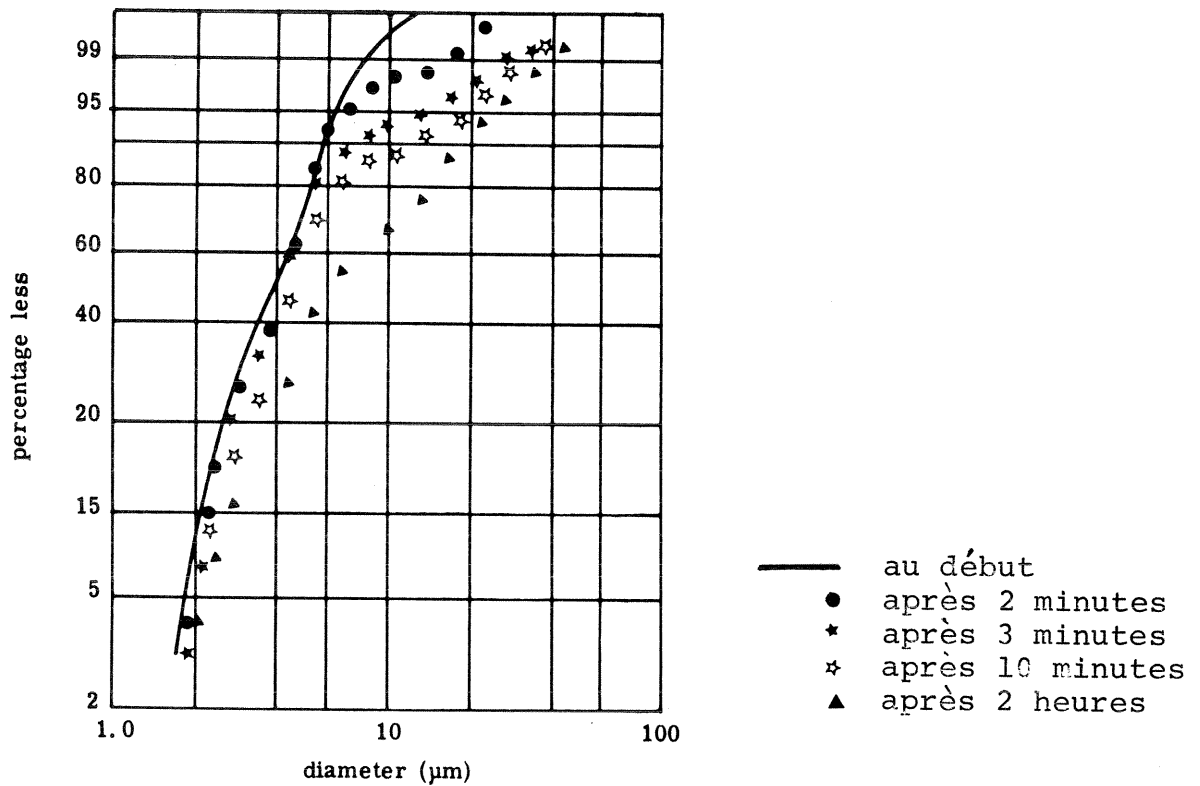


Figure D25 : Evolution expérimentale de la distribution cumulative des diamètres des particules, sous l'effet de l'agglomération et du dépôt.

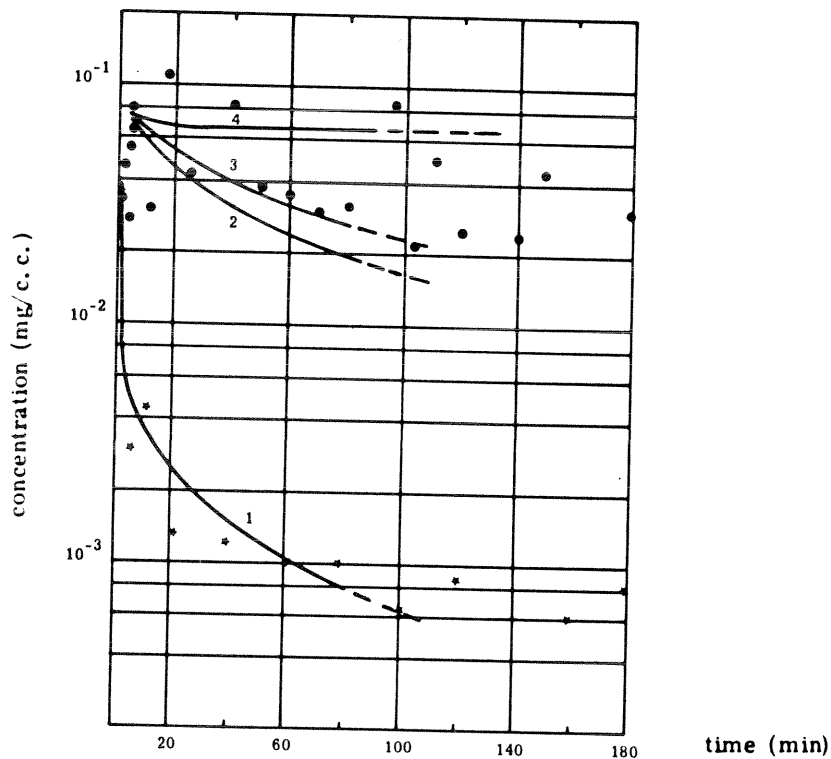


Figure D26 : Comparaison entre théorie et expérience en ce qui concerne l'évolution de la concentration en fonction du temps.

- ★ particules normales ● particules avec revêtement
 - 1 courbe théorique pour particules normales
 - 2,3,4 courbes théoriques pour particules avec revêtement
- conditions : 4 bar ; 20°C, Reynolds = 120 000 .

D'autres essais consécutifs ont montré qu'un résultat semblable s'obtient aussi par l'application d'une telle couche sur les parois du canal. Les essais de cette technique prometteuse se poursuivent dans le cadre d'une recherche en dehors du P.E. ENERGIE.

Une recherche parallèle théorique a étudié la possibilité de prévenir la déposition par un jet pariétal d'un gaz pur, notamment pour connaître la longueur sur laquelle l'effet protecteur d'un tel film persiste. Ce moyen pourrait être utilisé surtout pour protéger la fenêtre.

2.4.3. Jugement sur la méthode de l'absorption directe du rayonnement solaire

Un grand nombre de calculs comparatifs des cycles et machines solaires a été fait, accompagné de la construction d'un prototype pour procéder à l'évaluation de la nouvelle méthode d'absorption directe par rapport aux alternatives suivantes :

- . absorption du rayonnement sur une surface noire disposée dans une cavité, transférant ensuite cette énergie à un fluide derrière la surface absorbante ; ainsi le haut flux de rayonnement existe seulement dans l'ouverture de la cavité, tandis que les surfaces absorbantes reçoivent un flux modéré de sorte que leur surtempérature reste modérée
- . absorption du rayonnement sur une surface noire immergée dans le fluide à l'intérieur d'un canal transparent. De cette façon les problèmes liés aux particules, mais aussi leur avantage de la sélectivité, disparaissent. La question du maintien de la transparence des vitres à long terme (impu-
retés dans le gaz) persiste.

a) Machines thermiques solaires

Il convient de distinguer :

- . les moteurs à régime intermittent, du type Diesel, Stirling ou Wankel
- . les machines à régime continu, telles que turbine à gaz ou à vapeur avec turbomachines ou machines à piston hélicoïdal.

En considérant tous les aspects (rendement, technologie, fiabilité) notre jugement est plutôt négatif pour l'absorption directe, parce que les avantages thermodynamiques ne sont pas tels qu'ils compensent les incertitudes technologiques.

Pour les machines intermittentes il faut remarquer qu'une suspension de particules n'est pas comptable avec le frottement des segments de pistons ; seul le moteur Stirling paraît adéquate, parce que l'échauffement se fait à l'extérieur des cylindres ; ici un capteur conventionnel à cavité suffit parfaitement, ce que nous avons testé dans un prototype.

Pour les machines à régime continu, les deux alternatives (absorption normale dans cavité ou absorption sur surface immergée) sont nettement préférables.

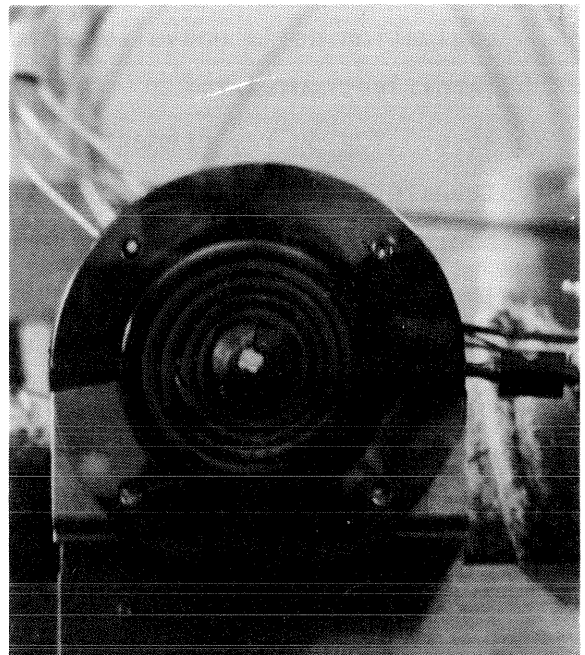
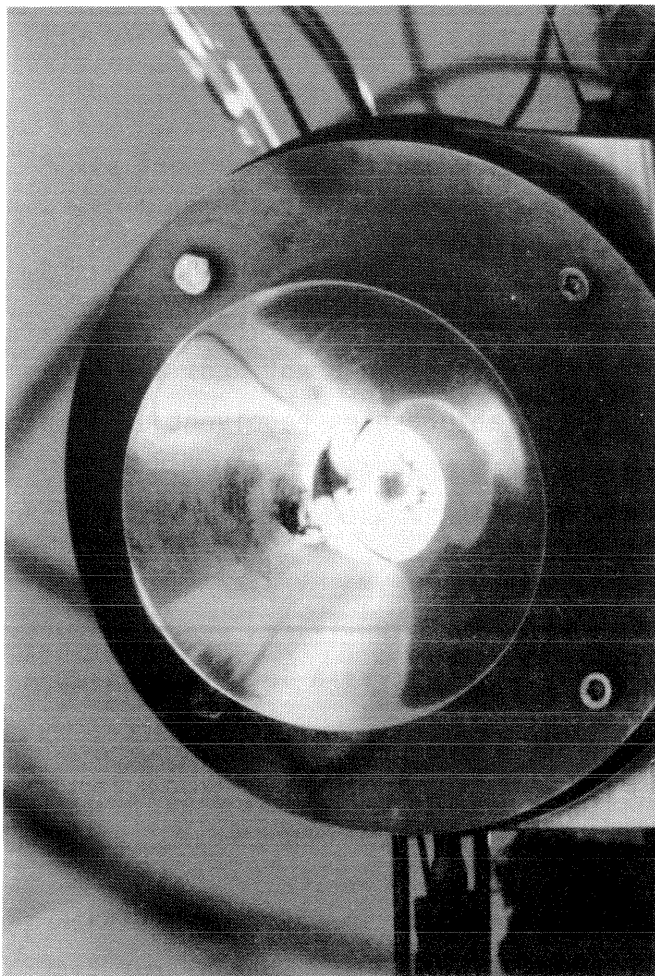


Figure D27 : Capteur solaire spiralique placé dans un rayonnement fortement concentré, chauffant le gaz circulant dans un moteur Stirling dans son passage du piston froid au piston chaud.

b) Thermochimie

Il paraît cependant qu'un potentiel réel de l'absorption directe existe pour la thermochimie solaire. Elle est destinée à convertir l'énergie solaire en énergie chimique d'un produit synthétique qui peut facilement être stocké et transporté. Lors de l'utilisation une deuxième réaction libère la chaleur. La réaction thermochimique se fait d'autant mieux que la température est haute, donc la nécessité du rayonnement concentré ; il est concevable que l'un des corps en réaction ou un catalyseur puisse, dans la forme de fines particules, absorber directement l'énergie solaire à l'endroit de la réaction.

2.4.4. Conclusions

Résumons pour finir les résultats et acquis de la recherche dans le secteur "Machines thermiques solaires par absorption directe de l'énergie solaire" :

- . conception de la suspension de particules dans des gaz comme milieu absorbeur du rayonnement avec propriétés sélectives, calculées et vérifiées par des essais
- . méthode théorique pour décrire l'évolution de suspensions sous l'effet de l'agglomération et du dépôt confirmée par des essais
- . détection de l'effet stabilisateur de fines couches appliquées aux particules ou aux parois
- . jugement sur le potentiel de l'absorption directe du rayonnement dans une suspension : plutôt négatif pour les machines thermiques, positif pour les procédés de thermochimie
- . technique de mesure dans des flux de rayonnement à haute concentration
- . technique expérimentale pour l'investigation de suspensions (utilisable dans d'autres domaines, tels que la combustion du charbon en lit fluidisé)
- . essais prototypes sur les composants spécifiques de moteurs Stirling solaires
- . informations et compétences pour chiffrer les technologies des machines solaires pour la banque de données du volet MODELISATION.

2.5. Stockage de l'énergie thermique par chaleur latente de fusion

2.5.1. But

Le stockage d'énergie thermique constitue une étape indispensable à la mise en valeur soit d'énergies de rejet, soit surtout de l'énergie solaire. Le stockage par chaleur latente de fusion qui présente l'avantage d'une densité d'énergie élevée et d'une température de travail pratiquement constante, est associé également à des difficultés liées aux substances utilisées, et au transfert de chaleur, difficiles dans ce milieu. Nous nous sommes attachés à l'étude des points suivants :

- . étude des produits
- . étude de transfert de chaleur
- . étude des systèmes d'exploitation
- . étude de l'intégration du stock latent dans une installation de production d'énergie.

2.5.2. Actions

● Etude de produits

Etude bibliographique : de nombreux produits chimiques sont utilisables pour le stockage latent. La compilation des données fournies par la littérature permet de choisir les produits répondant le mieux aux critères d'utilisation : les paraffines et les hydrates salins.

Etudes expérimentales

- . mesure calorimétrique : ayant pour but de déterminer l'enthalpie de fusion et la chaleur spécifique du milieu de stockage
- . mesure des propriétés physico-chimiques : telles que la viscosité, la conductivité thermique ou le coefficient d'expansion lors du changement de phase. Pour le milieu de stockage agitable biphasé, le liquide de support et les additifs font l'objet de la même étude
- . étude de la formation et de la stabilisation du milieu agitable : recherche sur la méthode de préparation et la détermination de la composition et de la nature d'éventuels additifs
- . test de vieillissement et de stabilité ; les paraffines sont soumises à des cycles de fusion-cristallisation répétés pour étudier leur vieillissement. Les milieux de stockage agitables sont soumis à des contraintes thermiques ou mécaniques pour s'assurer de leur bon fonctionnement pendant les processus de stockage

. étude de corrosion : ayant pour but de choisir les matériaux de construction convenant aux propriétés des milieux de stockage.

● Etude de transfert de chaleur

La détermination du coefficient de transfert de chaleur du stock, dans diverses conditions de fonctionnement, constitue l'élément de base de son dimensionnement.

Transfert de chaleur dans un stock statique

Le milieu de stockage utilisé est une paraffine pure (Pierpont 60/62) dont le caractère chimique inerte permet d'effectuer les essais avec différents échangeurs de chaleur commercialisés dont le matériau de construction n'est pas spécifique.

Les essais de laboratoire, à l'échelle d'une dizaine de kg, effectués sur différents types ou dispositions de l'échangeur et avec divers "remplissages" (sous forme de copaux métalliques servant à augmenter la conductivité thermique équivalente du milieu) ont permis de fixer le choix sur les échangeurs appropriés. L'étude détaillée du transfert de chaleur a été effectuée à l'échelle pilote avec deux échangeurs choisis : un stock parallélépipédique contenant 194 kg de paraffine avec un échangeur à plaques de $4,3 \text{ m}^2$, un deuxième stock cylindrique contenant 140 kg de la même paraffine, avec un échangeur à ailettes de $8,6 \text{ m}^2$.

Transfert de chaleur dans un stock agité

Le milieu de stockage utilisé est constitué par une dispersion de 55 % de $\text{NaOH.H}_2\text{O}$ dans l'huile minérale (voir plus loin).

a) Technique de la cuve agitée

Avec un stock cylindrique à double manteau de contenance de 2 litres, l'étude de l'action de l'agitation sur l'efficacité de transfert, sur la stabilité dynamique de la dispersion, ainsi que sur la puissance mécanique dépensée a permis de choisir le type d'agitateur approprié. Sur la base des résultats du laboratoire, une cuve pilote de contenance de 50 litres, avec double manteau, muni d'un agitateur à double hélice a été construite. Les mesures du couple du moteur et du coefficient de transfert de chaleur, à différentes vitesses d'agitation, ont permis de quantifier l'efficacité d'échange de chaleur du stock en fonction de la puissance mécanique dépensée.

b) Technique du four tournant

Un modèle de laboratoire du four tournant, avec une contenance de 10 litres, a été construit. Un même programme d'étude que pour la cuve agitée a été effectuée pour cette technique d'exploitation du milieu de stockage agitable.

● Etude de l'intégration du stockage thermique

La production d'eau chaude sanitaire par l'énergie solaire a été choisie pour l'étude des problèmes d'intégration du stockage thermique en général, et du stockage latent en particulier.

Un prototype de stock statique à paraffine de 38 kWh de capacité (925 kg de paraffine Pierpont 60/62), muni de 37 m² d'échangeurs à plaques est couplé avec deux stocks sensibles à eau de capacité respective 100 litres et 300 litres. Les stocks sensibles servent à assurer la consommation journalière (100 litres) et le préchauffage de l'eau entrante (300 litres). La capacité de stockage de l'ensemble a été dimensionnée pour assurer l'autonomie en eau chaude solaire pour une famille de 5 personnes pendant la période entre mars et octobre. L'énergie fournie aux stocks provient de 19,2 m² de collecteurs plans montés sur le toit d'une villa familiale à Sonzier s/Montreux. La charge des stocks suit une logique qui dépend de la mesure de température de chaque stock, et qui fixe la priorité la plus élevée au stock journalier. Un système de mesure permet d'enregistrer les différentes températures (stock, collecteurs, extérieur), l'intensité d'insolation et le comptage de l'énergie fournie, stockée ou consommée.

2.5.3. Résultats

● Etude de produits

Une liste de produits utilisables comme milieu de stockage, ainsi que quelques unes de leurs propriétés, a été établie avec les critères de choix (Réf. 36).

a) Etude des paraffines (Réf. 45)

Ces produits possèdent un caractère chimique inerte et non toxique. Leur chaleur de fusion est comprise entre 170 et 200 MJ.m⁻³. Etant un mélange, leur domaine de fusion s'étale en général sur quelques °C, par exemple entre 55 et 62 °C pour la Pierpont 60/62. Ces produits ne présentent pas d'irréversibilité lors des cycles de fusion-cristallisation, leur changement de volume lors de la fusion est relativement

élevé, entre 10 et 13 %. Leur conductivité thermique est faible 0,28 W/mK à l'état solide et 0,23 W/mK à l'état liquide. Leur prix se situe entre 1,30 et 1,60 Frs/kg (1976) selon la qualité. Parmi les paraffine étudiées, seule la Pierpont 60/62 a donné des résultats satisfaisants aux test de vieillissement.

b) Etude du milieu de stockage agitable

Deux possibilités de formation de milieux agitables ont été étudiées. La première possibilité consiste à disperser un hydrate salin dans un excès d'eau de cristallisation (Réf. 38). Cette méthode est applicable aux hydrates possédant un diagramme de phase du type de celui du sel de Glauber ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Le cas du sel de Glauber a été étudié ; par exemple un mélange de 38 % de Na_2SO_4 et de 62 % d'eau constitue, après cristallisation de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ à 32,5 °C, une suspension de 50 % vol. de solide dans une solution saturée. L'enthalpie de fusion du mélange est de 183 MJ m^{-3} , soit 0,52 fois celle de l'hydrate à l'état pur. Outre l'augmentation du coefficient de transfert de chaleur, l'utilisation d'une telle suspension permet de supprimer, par l'agitation, l'irréversibilité des cycles due à la fusion incongruente du sel de Glauber. Cependant, avec ce type de suspension non stabilisée, le problème du frittage des cristaux au repos du stock est encore à résoudre.

La deuxième méthode de formation du milieu agitable consiste à disperser le matériau changeant de phase (MCP) dans un liquide de support non miscible et de caractère opposé : MCP hydrophile dans un liquide hydrophobe et vice versa (Réf. 39). Les essais ont été effectués avec divers hydrates salins, $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{K}_3\text{PO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, dispersés dans une huile minérale neutre. Le cas du monohydrate de soude a été étudié en détail ; les résultats montrent que la stabilité de la dispersion, sous l'action des contraintes thermiques et mécaniques, est meilleure avec un émulsateur légèrement hydrophile qu'avec un émulsateur hydrophobe. La poudre de graphite s'est avérée être un excellent agent stabilisateur.

c) Etude de corrosion (Réf. 40)

L'étude a été effectuée pour $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ et pour sa dispersion dans l'huile. Le cuivre et l'acier inox se sont avérés être les meilleurs matériaux de construction avec un taux de corrosion de l'ordre de

10 μ /an. Dans le cas de la dispersion, l'enveloppe d'huile diminue considérablement l'agressivité du MPC, elle empêche la carbonation de $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ à l'air et diminue de moitié ou plus le taux de corrosion des métaux de construction.

● Etude de transfert de chaleur

Stock statique (Réf. 41)

Les résultats ont montré que le transfert de chaleur dans un stock statique est assuré principalement par la conduction. Le coefficient de transfert global du stock est ainsi faible et dépend fortement de l'épaisseur de la couche de produit entre deux surfaces d'échange ou du temps (voir figure D28). Ces résultats permettent de dimensionner la surface nécessaire de l'échangeur selon la puissance donnée de la source d'énergie ou de la consommation.

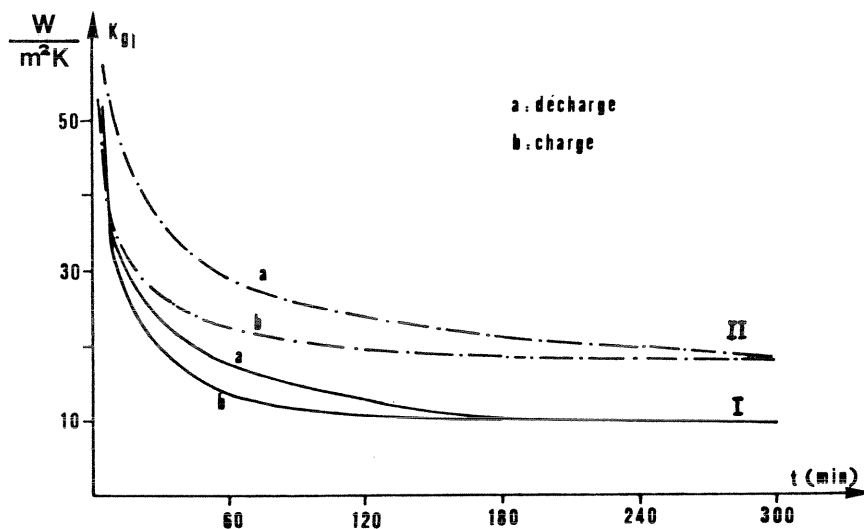


Figure D28 : Stock statique : coefficient de transfert de chaleur en fonction du temps.

I : Echangeur à plaques

II : Echangeur à ailettes

Stock agité (Réf. 42, 43)

Pour la cuve agitée, le coefficient de transfert global dépend de la vitesse d'agitation et du débit du fluide caloporteur circulant dans l'échangeur (voir figure D29). Pour un débit donné, la dépendance entre le coefficient de transfert et l'agitation s'exprime sous forme : $\bar{K}_{g1} = A(P/V)^X$ où A est une constante dépendant du débit du fluide caloporteur.

La valeur de x dépend du niveau de stock, du sens du flux de chaleur et varie entre 0,2 et 0,4 ; P/V étant la puissance volumique nette introduite.

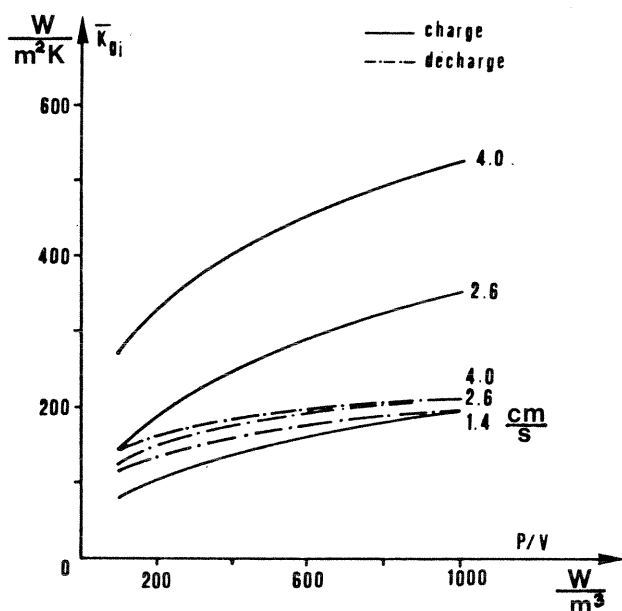


Figure D29 : Cuve agitée : coefficient de transfert de chaleur en fonction de la puissance d'agitation spécifique.
Paramètre : vitesse de circulation du fluide caloporteur.

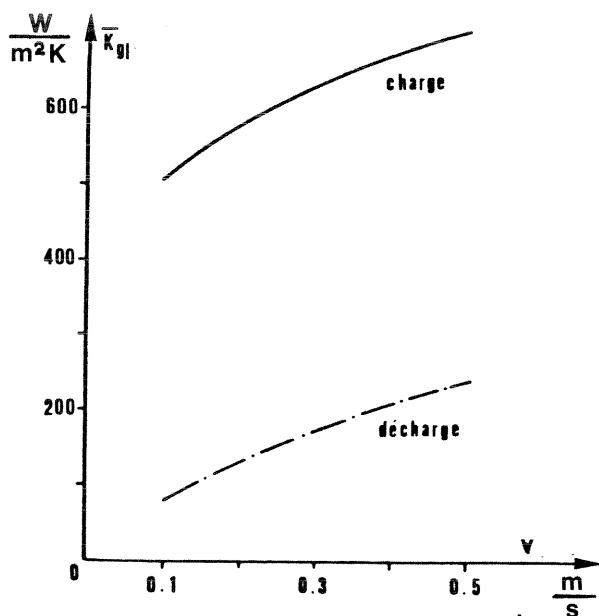


Figure D30 : Four tournant : coefficient de transfert de chaleur en fonction de la vitesse périphérique.

Le coefficient de transfert de chaleur du four tournant est indépendant du débit du fluide caloporteur. L'effet de brassage du four tournant est moins bon que celui de la cuve agitée. Le coefficient de transfert varie ainsi considérablement entre la charge et la décharge (figure D30). La dépendance entre \bar{K}_{g1} et la vitesse du four peut être exprimée par : $\bar{K}_{g1} = B \cdot v^y$ où B est une constante dépendant du niveau du stock et du sens du flux de chaleur ; la valeur de y est de l'ordre de 0,2 pour la charge et 0,7 pour la décharge, v étant la vitesse périphérique du four. La puissance mécanique dépensée est faible, de l'ordre de 50 W tonne⁻¹. Pour une vitesse donnée, elle dépend uniquement du poids total du four.

● Etude de l'intégration du stockage thermique dans une installation solaire

a) Capacité du stock (Réf.36)

La capacité du stock dépend d'une part des besoins, d'autre part des données météorologiques du degré d'assurance désiré. Pour la production d'eau chaude sanitaire par exemple, d'après les données météorologiques de la région lémanique pour la période entre mars et octobre, la probabilité de couvrir entièrement les besoins passe de 15 à 80 % quand la taille du stock, exprimée en jours de consommation, passe de 1 à 4 jours.

b) Transfert de chaleur

Dans une installation solaire, la puissance lors de la charge du stock est déterminante dans le calcul de la puissance d'échange du stock.

Dans le cas du stock statique, la surface d'échange est un degré de liberté du dimensionnement, d'après la valeur du coefficient de transfert, elle est dimensionnée pour satisfaire les conditions de fonctionnement des collecteurs (Réf. 44). Dans le cas d'un stock agité, la surface d'échange dépend de la géométrie du stock, le gradient de température et le coefficient de transfert de chaleur doivent être adaptés pour assurer une puissance acceptrice suffisante du stock. Dans ce cas, la température de collection et la puissance d'agitation du stock sont des variables dépendantes et doivent être optimisées. Un calcul dans ce sens a été effectué pour une cuve agitée contenant 0,50 m³ de dispersion de NaOH · H₂O dans l'huile ; le stock est incorporé dans une installation de production d'eau chaude solaire. L'optimisation a conduit à une puissance d'agitation nette de 220 W m⁻³, soit une dépense énergétique totale (rendements mécanique et électrique du moteur compris) de 4 % de l'énergie stockable dans une suspension de 55 % p de NaOH · H₂O (Réf. 42 , 43).

c) Résultats du prototype (Réf. 37)

Les mesures effectuées avec le stock latent seul ont conduit à des puissances d'échange de 6,24 kW pour la charge, et de 4,7 kW pour la décharge. Ces valeurs correspondent aux valeurs calculées et confirment la validité du modèle de dimensionnement de l'échangeur.

Durant l'année 1978, l'ensemble du système de stockage a fourni au consommateur 2 400 kWh d'eau chaude sanitaire (entre 55 et 75 °C), dont plus de 300 kWh ont été stockés durant 4 à 5 jours dans le stock latent à paraffine. La participation du stock latent est de 12,5 % sur l'année, et de 18 % pendant la période entre mars et octobre. En tenant compte de la capacité des deux stocks sensibles et des données météorologiques, cette participation représente presque la valeur maximale que peut atteindre le stock latent. Le stock à paraffine constitue donc la marge de sécurité (ou de confort) du système, qui permet d'assurer la fourniture d'eau chaude, même pendant 4 jours consécutifs de mauvais temps, ainsi le rendement global du système de stockage durant 1978 a été de 50 %.

2.6. Evaluation socio-économique de l'énergie solaire pour le chauffage et l'eau chaude

2.6.1. Objectifs

L'objectif de la recherche était d'une part de réunir des données économiques, sociales et urbanistiques concernant le chauffage solaire et pouvant être utilisées par les autres volets du P.E. ENERGIE et, d'autre part, de fournir les éléments de décision nécessaires aux choix (au niveau, fédéral, cantonal, communal) de politiques énergétiques.

2.6.2. Méthodes de recherche

Dans la plupart des cas, les méthodes utilisées ont un caractère statistique : là où les données étaient disponibles - p.ex. recensement - il était possible de traiter ces informations par ordinateur. Là où il n'y avait pas de données homogènes suffisantes, il fallait procéder à un recensement primaire sur place.

2.6.3. Résultats

● Estimation des potentialités du chauffage solaire actif en Suisse

Se fondant sur le Recensement fédéral 1970, le parc immobilier a été classé selon des critères susceptibles d'influencer les possibilités physiques d'installation de capteurs solaires. 26 paramètres ont été utilisés pour analyser les quelques 2'000'000 de logements. Nous avons ainsi cherché à mettre en relief, en rapport avec nos objectifs, d'une part les données physiques des logements et des bâtiments (tels grandeur, nombre de pièces, date de construction, système de chauffage et distribution d'eau chaude, etc.), la localisation (ville-campagne, montagne-plaine, etc.) et, d'autre part les données socio-économiques des logements (loyer, charges de chauffage, type de logement, densité, etc.). Ces données ont été analysées sur tableaux synoptiques et sur cartes géographiques par commune.

La recherche a abouti, après correction, à une estimation du nombre de m² de capteurs pouvant être théoriquement installés en Suisse



Figure D31 : Communes avec un potentiel de plus de 3.75 m² de capteurs par personne.

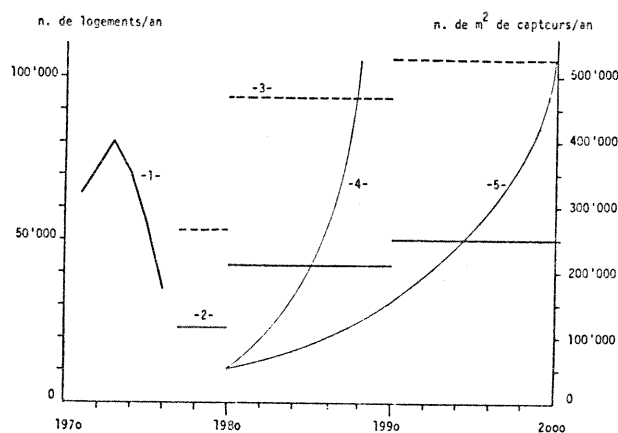


Figure D32

— Prévission de l'évolution de la construction annuelle de logements en Suisse et des potentialités, en termes de m^2 de capteurs actifs, qui en découlent.

1. Logements construits annuellement jusqu'à aujourd'hui.
2. Prévission de la production annuelle de logements selon le Dr T. Angelini.
3. Potentialités annuelles en termes de m^2 de capteur.
4. Evolution de la production annuelle de systèmes solaires avec un taux de croissance de 78 % (1980 = 50 000 m^2).
5. Evolution de la production annuelle de systèmes solaires avec un taux de croissance de 12 %, l'objectif étant de satisfaire à la demande théorique annuelle en l'an 2000.

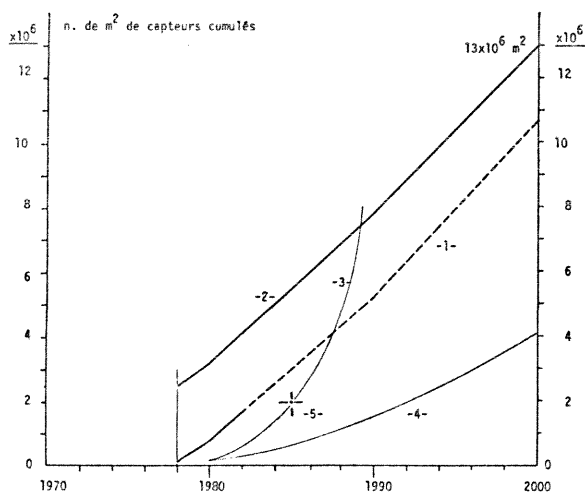


Figure D33

— Prévission des potentialités annuelles en termes de m^2 de capteurs.

1. Potentialités théoriques des constructions futures.
2. Potentialités théoriques des constructions futures, plus celles qui existent actuellement.
3. Production cumulée de capteurs avec un taux de croissance de 78 % (nécessaire pour atteindre l'objectif de la GEK).
4. Production cumulée de capteurs avec un taux de croissance de 12 %.
5. Objectif de la GEK (rapport intermédiaire), soit 1000 Tcal à raison de $5 \cdot 10^{-4}$ Tcal par m^2 de capteur.

● Attitudes politiques des communes-test

A partir des données de la recherche précédente, 29 communes-test ont été choisies qui sont statistiquement représentatives de la Suisse du point de vue des paramètres retenus.

N° de la stratégie	Nom de la commune	Surface de capteurs	
		1	2
1	Sagno	411,8	447,5
1	Molondin	0,0	463,6
2	Dozwil	1'446,3	1'100,1
2	Rovio	2'128,8	1'285,9
2	Vaglio	1'720,4	958,0
2	Cheserex	710,9	829,5
2	Tannay	1'632,6	1'191,3
2	Nax	348,1	1'271,8
3	Schattenhalb	36,3	2'141,0
3	Erschwil	0,0	2'365,0
3	L'Abbaye	1'899,3	2'340,6
4	Wila	160,0	3'115,9
4	Val d'Illiez	1'368,8	2'952,7
5	Lungern	2'694,8	4'508,5
5	Schwanden	3'905,0	5'175,4
5	Menzingen	676,1	4'661,4
6	Zumikon	4'699,9	6'045,1
6	Thunstetten	3'269,6	6'320,5
7	Trimbach	12'155,7	9'528,6
7	Diepoldsau	2'873,7	8'213,1
7	Losone	6'348,0	9'447,8
8	Küsnacht	32'910,9	16'085,4
8	Sarnen	7'826,0	13'646,1
8	Vernier	15'376,8	13'772,4
9	Wetzikon	15'780,0	18'710,4
9	Dübendorf	10'417,2	23'545,8
9	Aarau	21'920,1	21'120,7
9	Frauenfeld	manque	55'665,0
10	Berne	196'050,0	53'828,9
10	Bâle	303'184,0	57'089,4

Surface totale de capteurs solaires qu'on pourrait mettre sur les toits des communes types.

Colonne 1 : résultat de l'enquête sur terrain

Colonne 2 : résultat d'une analyse théorique préalable

Ces communes ont fait l'objet d'une analyse détaillée en ce qui concerne l'attitude des autorités vis-à-vis du chauffage solaire compte tenu des conditions particulières de ces communes. Cette recherche a permis de vérifier les résultats de l'étude ci-dessus et a constitué la base de départ pour la recherche sur les réglementations et procédures à l'égard du chauffage solaire (Réf. 57).

● Obstacles réglementaires et de procédure

Cette recherche a permis d'identifier les obstacles de caractère juridique, politique, et de procédure s'opposant au développement de l'architecture solaire. L'étude contient :

- . l'analyse comparative des procédures d'autorisation de construire dans l'ensemble des Cantons, voir fig. D34.
- . l'identification des domaines de réglementation qui peuvent s'opposer à diverses formes de construction destinées à exploiter l'énergie solaire
- . une analyse descriptive détaillée de 7 cantons-test en matière de réglementation, jurisprudence et politique énergétique
- . une description d'une série de cas litigieux d'autorisations de construire pour installations solaires.

Cette recherche a été entreprise en collaboration avec la Chaire de construction du Département d'architecture et sur mandat et définition de la KNS (Commission fédérale d'experts pour l'utilisation de l'énergie solaire).

L'étude a permis de mettre en évidence l'importance des règles d'utilisation du sol (CUS, COS) et les lacunes juridiques en matière de dérogations. La conclusion de ce travail sera l'élaboration d'une brochure d'information destinée aux différents partenaires du processus de production du domaine bâti.

● Etude du marché solaire actuel dans trois Cantons (VD, TI, BE) et perspectives de son développement

Trois recherches menées dans trois cantons comprenaient une enquête exhaustive sur toutes les installations existantes dans les Cantons de Vaud et Tessin ainsi que sur un échantillon représentatif (41 cas) dans le Canton de Berne. Ces enquêtes décrivaient :

- . les données relatives à la construction soit : type de bâtiment, coût de construction, qualité d'isolation, âge, etc

- . l'utilisation de l'énergie solaire : eau chaude, chauffage, piscine, agriculture, industrie, etc
- . type d'énergie d'appoint : électricité, mazout, bois, charbon, gaz, etc
- . type et dimension de l'installation solaire, ses caractéristiques techniques
- . coût des installations
- . l'emplacement des installations
- . les caractéristiques de l'utilisation des installations solaires
- . les données socio-professionnelles concernant le propriétaire et sa famille
- . enfin les données concernant le fournisseur des équipements.

Ainsi la physionomie de l'ensemble du marché solaire ainsi que les mesures susceptibles de consolider son développement ont pu être identifiées.

● Aspect micro-économique

On peut affirmer d'une manière générale qu'une installation solaire active ou passive ne devrait guère avoir de frais variables (c'est-à-dire dépendant de la quantité de chaleur produite) et cela contrairement à toutes les autres systèmes de chauffage consommant un porteur d'énergie commercial.

Les bâtiments existants ont tous une conception qui tient compte des conditions de chauffage prévues au stade de la planification. Il est coûteux de changer cette conception et d'y surajouter des équipements solaires ; une telle révision est le mieux concevable lors d'une rénovation générale. Dans une immeuble de rapport, tous les frais relatifs à l'investissement sont payés par les recettes générales de l'immeuble. C'est le cas aussi pour les équipements : le chauffage, la distribution d'eau chaude, d'électricité, le téléphone, etc ; seules les consommations réelles sont payées par les locataires. Ainsi, pour le propriétaire, la seule question financière qui se pose est de savoir si un immeuble à architecture solaire ou un immeuble équipé de capteurs solaires est compatible avec son plan financier.

Le montant disponible peut être augmenté en spéculant sur une baisse des taux d'intérêts ou en augmentant les loyers grâce à la présence de l'équipement solaire. A défaut, le propriétaire peut rationaliser les volumes, ou simplifier certaines exécutions pour obtenir les fonds nécessaires pour l'équipement solaire. Le mazout, payé par le locataire, n'entre dans son

calcul qu'indirectement comme toile de fond, dans une optique à long terme, ou bien à travers les anticipations du locataire qui lui, spéculant sur une hausse des prix du mazout, peut être disposé de payer un loyer un peu plus élevé.

En ce qui concerne les maisons individuelles, d'après nos enquêtes, les propriétaires prévoient presque toujours des hausses excessives des prix du mazout. Cette anticipation, combinée avec la volonté de "faire quelque chose" pour l'environnement, a suffi pour faire démarrer le "marché solaire". Si les hausses des prix du mazout continuent, il est probable que la tendance actuelle se renforcera. Dans ce secteur aussi, l'aspect "sécurité" jouit de la priorité sur les économies de mazout à court terme.

2.6.4. Conclusions

On trouvera un résumé des conclusions générales dans la référence 62.

Ce cahier réunit six contributions différentes qui ont pour objectif de cerner la problématique économique liée au développement de systèmes de chauffage solaire actif dans le bâtiment existant et futur. Ces six contributions traitent des aspects suivants :

- . rentabilité du chauffage solaire
- . financement des systèmes de chauffage solaire
- . organisation du marché solaire
- . chauffage solaire et incidence sur les loyers
- . chauffage solaire et incidence sur la dépense des ménages
- . chauffage solaire comme alternative au chauffage au mazout
- . marché solaire et secteur de la construction.

Cet ensemble de contributions concerne la Suisse et, conformément aux objectifs du P.E. ENERGIE, permet d'apporter un début d'évaluation économique du chauffage solaire.

● Potentiel

Depuis la crise du pétrole, on a proposé de plusieurs côtés d'installer sur l'ensemble de la Confédération une surface impressionnante de capteurs solaires (vingt millions de m²), en vue d'économiser le mazout et, accessoirement, d'autres combustibles. Cette proposition nous paraît aujourd'hui peu réaliste. Les raisons en sont multiples.

- . l'installation du chauffage solaire sur les bâtiments existants est le plus souvent problématique et nécessite des travaux de transformation parfois important
- . la fabrication (ou l'importation) d'une telle quantité de capteurs en ferait certainement augmenter et non diminuer le prix. En fait, une part importante du coût est constitué du prix des matières premières qui sont à court terme incompressibles. De plus, même si l'industrie réussissait à fabriquer les installations, il nous manquerait la capacité de montage sur chantier
- . il est peu avantageux de monter des capteurs solaires sur des bâtiments conçus en fonction du chauffage à mazout, basé sur l'utilisation extensive de ce combustible.

Il apparaît, en revanche, que le chauffage solaire peut être intéressant pour les bâtiments neufs où, dès le départ, l'architecte peut tenir compte des conditions climatiques du lieu, ou bien, lors de rénovation totale d'anciens immeubles. Cette voie permettrait une croissance raisonnable de l'industrie fabriquant ces installations et de l'activité des spécialistes (ingénieurs, installateurs) responsables du calcul et de la mise en place des équipements.

● Rentabilité

On peut considérer que l'amélioration énergétique d'un bâtiment et l'éventuel surplus de coût de construction qu'elle entraîne est une dépense financièrement raisonnable, étant donné la tendance actuelle du prix du combustible. Cette observation se justifie par le principe même que le chauffage solaire (actif ou passif) ne représente que très peu de frais variables tandis que tous les autres systèmes sont consommateurs de combustible ou d'énergie électrique.

Mais en écoutant le débat sur la rentabilité, l'analyste reste perplexe parce que c'est la première fois qu'on discute sur la "rentabilité" d'un équipement particulier d'un bâtiment, en comparant le coût d'investissement d'une part et l'économie de mazout annuelle d'autre part. Nous avons cherché à démontrer cette erreur dans plusieurs communications.

● Structure du marché

L'étude fait apparaître un certain désordre sur le marché des installations solaires, causé par le manque de concurrence et par l'absence de

normes et, par conséquent, par l'absence de termes de référence auxquels l'utilisateur puisse se fier. Mais cela est normal dans le cas d'une technologie naissante.

La situation actuelle commande donc une meilleure organisation, plus transparente, du marché et son élargissement à une clientèle potentielle, moins aisée matériellement, moins convaincue idéologiquement et moins intéressée à des expérimentations.

3. TECHNOLOGIES SOLAIRES POUR L'AMENAGEMENT ENERGETIQUE DES BATIMENTS EN SUISSE

Dans le contexte de l'aménagement énergétique des bâtiments, beaucoup de technologies solaires sont envisageables. Compte tenu des exigences et possibilités du modèle mathématique RETINE établi pour étudier la situation énergétique en Suisse, nous n'avons pris en considération que les technologies solaires

- . qui sont suffisamment développées pour être introduites dès maintenant
- . dont les données économiques peuvent être déterminées avec une certaine précision (incertitude inférieure à facteur 2 !).

D'autres technologies pourront être introduites au moment où elle seront développées à un niveau permettant de remplir ces deux critères. Nous pensons ici par exemple aux cellules photovoltaïques.

Les chiffres cruciaux d'une technologie solaire sont évidemment

- . la récolte annuelle (puissance moyenne)
- . le prix d'investissement, c'est-à-dire le capital spécifique
- . le taux de couverture des besoins par l'énergie solaire et par l'énergie d'appoint
- . le niveau de saturation éventuel.

Les technologies solaires considérées sont indiquées dans le tableau suivant, avec l'ordre de grandeur des différentes valeurs.

Avec ces données, plusieurs scénarios ont été calculés, voir chapitre E. Il faut néanmoins souligner que ces valeurs ne sont pas des pronostics, mais des exercices montrant l'influence des affectations, si elles pouvaient être choisies librement.

	Energie annuelle		Prix kFr	Saturation en Suisse
	kWh/an Totale	kWh/an Solaire		
Chauffe-eau solaire (10 m ²) + Electricité pour villa	4 400	3 000	8	10 ⁶
Chauffage + Eau chaude solaires (30 m ²) + Mazout pour villas	31 400*	6 000*	40	0,5 · 10 ⁶
Chauffage solaire + stockage saisonnier pour quartier (4 500 m ²)	2 · 10 ⁶	1,66 · 10 ⁶	5 400	10 ⁴
Chauffage + Pompe à chaleur pour villa (30 m ²)	31 400	12 000	48	0,5 · 10 ⁶
Centrale électro-solaire	140 · 10 ⁶	140 · 10 ⁶	300 000	50
Centrale électro-solaire + Pompe à chaleur pour chauffage	350 · 10 ⁶	350 · 10 ⁶	450 000	50
Systèmes passifs pour villa	--	--	--	10 ⁶

* voir remarque sous 5.1.2.

4. RETOMBEES DE L'ACTIVITE DU VOLET SOLAIRE

4.1. Retombées indirectes

A) Le P.E. ENERGIE a manifestement stimulé la recherche solaire à l'EPF-L.

Cela s'est traduit de la façon suivante :

- l'EPF-L est devenue un des centres de recherches en héliotechnique en Suisse. En 1979, 24% de la recherche solaire dans le domaine public était effectuée à l'EPF-L, ce qui correspond à 2,5 mio francs (occupant ainsi la deuxième place après l'EIR (30%)).
- Des collaborateurs de l'EPF-L ont été appelés à plusieurs charges officielles :
 - . Commission nationale pour l'utilisation de l'énergie solaire (KNS)
(charge de président)
 - . Commission suisse pour l'énergie
 - . délégué suisse pour trois tâches de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE)

- échange et tenue à jour des projets et plans R & D des composantes et systèmes solaires
 - mesure des performances et modélisation d'installations solaires des types actif et passif
 - systèmes avec capteurs à vide.
- B) Des associations professionnelles, notamment la SIA, ont fait appel à plusieurs reprises à une équipe d'enseignants de l'EPF-L pour des cours de formation professionnelle (Sion, Genève, Monthey, etc.).
- C) L'héliotechnique a été introduite dans l'enseignement à l'EPF-L pour :
- . architectes, 4ème année ; cours à option
 - . ingénieurs mécaniciens, 4ème année, cours à option
 - . cours postgrade ENERGIE.
- D) Un grand nombre de conférences et de symposiums ont été organisés et donnés.
- E) Dans des pays en voie de développement, plusieurs activités concernant l'énergie solaire ont été assumées par des membres du Projet d'Ecole.
- . enseignement et création d'un laboratoire en conditionnement d'air et énergie solaire thermique à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT), 1974 - 1981
 - . conception et fabrication de pompes solaires pour des régions rurales de l'Inde, avec Indian Institute of Technology, Bangalore, 1977 - 1981
 - . formation de futurs enseignants (boursiers de la Confédération) en héliotechnique, dans le cadre de différents projets de collaboration avec :
 - université de Medellin, Colombie (1975-79)
 - université de Porto, Portugal (1974-79)
 - université de Khartoum, Soudan (1974-79)
 - université d'Amman, Jordanie (1977-80).
- F) Un certain nombre de mandats d'étude ont été confiés à des groupes de recherche du P.E. ENERGIE :
- . Confédération OFE 4
OFL 1
 - . Cantons Vaud 2
Valais 1
Fribourg 1
Berne 1
Tessin 1
 - . Communes divers mandats (Yverdon, Gland).

4.2. Applications pratiques

Les résultats des travaux exécutés dans le cadre du P.E. ENERGIE ont trouvé une application sous différentes formes, soit comme projets ou actions, soit en tant qu'utilisations techniques. Sans être exhaustifs, nous mentionnons les applications suivantes :

- . brochure d'information aux instances cantonales et communales, concernant les permis de construction d'immeubles avec installation solaire, élaborée sur mandat de l'OFE
- . étude et propositions pour l'incorporation de systèmes solaires dans les bâtiments EPF-L de la 2ème étape, à Ecublens
- . utilisation du procédé de traitement "anti-déposition" dans des recherches et procédés de suspensions gaz-particules non-solaires
- . 5 brevets concernant éléments de façade, capteur solaire, double vitrage sélectif, milieu de stockage
- . une bonne partie des considérations et propositions contenues dans un "programme d'essais concernant la durée de vie et la fiabilité d'installations solaires", élaboré par la SICC pour l'OFE, ont été tirées des expériences faites pour le P.E. ENERGIE. Les actions préparatoires pour la mise en oeuvre de ce programme ont démarré (Rapperswil).

5. ROLE DE L'ENERGIE SOLAIRE EN SUISSE

Le terme "économique" entre ici en considération sous deux aspects :

- A. Pour évaluer le rôle de l'énergie solaire dans la remplacement du pétrole comme agent énergétique, les questions techniques et météorologiques (combien de toits et de façades se prêtent-ils à l'utilisation de l'énergie solaire ? Quelle est l'énergie solaire annuelle captée par m² ? etc.) sont à compléter par la question de la rentabilité de l'énergie solaire.
- B. L'héliotechnique pourrait jouer un certain rôle pour le marché du travail en Suisse (potentiel anti-chômage), soit pour des produits utilisés en Suisse, donc pour le marché à l'intérieur du pays, soit comme bien d'exportation.

Nous allons dans la suite examiner ces deux aspects, qui sont évidemment liés.

5.1. Potentiel de remplacement

5.1.1. Aspects techniques

Il convient de bien distinguer:

- . l'énergie solaire directe
- . l'énergie solaire indirecte (énergie hydraulique, bois, biomasse).

Nous nous restreignons ici à l'utilisation directe, tout en admettant que, pour la biomasse, les limites s'estompent.

De plus, il faut toujours clairement indiquer l'horizon qui est visé dans le temps (an 2000 ou 2100).

Nous répétons ici notre mise en garde contre des promesses et des pronostics trop optimistes qui causent des déceptions ayant un effet nettement négatif pour une promotion saine de l'énergie solaire.

A long terme, le potentiel de l'énergie solaire en Suisse est considérable, soit que:

- . l'énergie soit captée en Suisse (10 - 30 %)
(systèmes thermiques actifs et passifs en Suisse, biomasse, production d'électricité - centrales thermiques, mais surtout cellules photovoltaïques -)
- . l'énergie soit importée en Suisse (tout chiffre entre 0 et 80 % est possible) sous forme de vecteurs d'énergie synthétisés par l'énergie solaire.

A court terme, le potentiel de l'énergie solaire est non-négligeable, mais modeste :

- . Systèmes actifs dans les immeubles d'un à trois étages, toujours en combinaison avec une autre source d'énergie. Pour les immeubles existant, l'orientation des faîtes, etc., est un des facteurs qui réduit le potentiel. D'autre part, l'évolution est freinée par les possibilités limitées en ce qui concerne le montage, qui doit être effectué par du personnel qualifié. Pour les nouveaux bâtiments, la situation est meilleure, en combinaison aussi avec des systèmes passifs.
- . Systèmes actifs pour la chaleur industrielle (80° à 120°). Ce secteur paraît particulièrement avantageux (surfaces disponibles, peu de problèmes esthétiques).
- . Systèmes passifs intimement liés à une nouvelle conception architecturale et aux mesures d'isolation. Le potentiel considérable concerne surtout (pas exclusivement) les nouveaux bâtiments et constitue notamment, à côté des questions techniques, un problème d'information et d'attitude chez les architectes et les maîtres de l'ouvrage.

- . Cellules photovoltaïques, pour lesquelles des perspectives prometteuses s'annoncent ; les problèmes de l'interconnection au réseau électrique sont d'ailleurs à traiter avec soin ; elles sont souvent négligées par les promoteurs.
- . Pour le stockage à long terme, le stockage dans le sol en combinaison avec des aspects géothermiques et des pompes à chaleur paraît intéressant, mais plutôt ponctuellement ; pour le stockage à court terme et à moyen terme, les solutions retenues dépendront surtout de l'économie et de la manipulation facile (chaleur latente ou sensible).

5.1.2. Aspects de rentabilité

Le calcul de la rentabilité du chauffage solaire est extrêmement délicat et aucune méthode proposée ne donne vraiment satisfaction. La raison en est que les investissements sont noyés dans le plan financier global de l'immeuble et il n'est pas obligatoire qu'une maison solaire coûte globalement plus chère qu'une maison non solaire. Même le coût des systèmes actifs peut être totalement ou partiellement compensé par des réductions du coût réalisées sur d'autres parties du bâtiment. Dans un tel cas, on pourrait dire, par exemple, que le jeu de substitution se fait entre d'une part une terrasse couverte, un grand garage et d'autre part le chauffage solaire. Néanmoins il faut essayer de fonder la "rentabilité" sur une évaluation équitable et complète, de sorte que pour deux solutions soumises à une comparaison (solaire-non solaire) :

- . les frais de capital et d'exploitation sont calculés
- . pour les frais du capital, l'ensemble des investissements touchés doit être considéré pour les deux solutions.

Un deuxième point est évidemment une évaluation correcte du gain en énergie par m^2 de surface solaire. La fonction "coût annuel" par rapport à la surface installée dépend du profil des besoins et du gain solaire et à l'allure type de la figure D35a pour 3 immeubles de construction nouvelle, avec les données de la fig. D35b.

Sous cet angle, nous arrivons aux conclusions suivantes, avec prix du mazout actuel (60.-- Fr/ 100 kg) et taux d'intérêt actuel (6%) :

- . pour les immeubles existants, la production d'eau chaude est légèrement plus chère avec l'énergie solaire qu'avec le mazout
- . pour les immeubles récents, la production d'eau chaude par énergie solaire, combinée avec un boiler électrique, est rentable

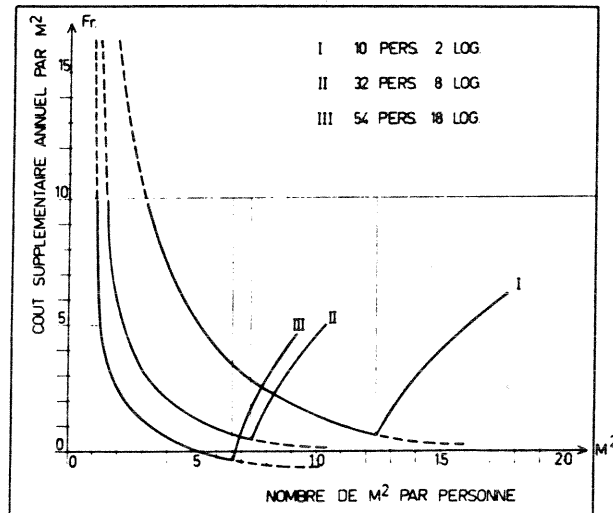


Figure D35a : Coût moyen supplémentaire par m² de capteur en fonction de la surface de capteur (trois bâtiments théoriques). La discontinuité marque la limite au-delà de laquelle l'énergie solaire captée ne peut plus être utilisée entièrement en été.

	I	II	III
Nombre de logements	2	8	18
Nombre d'habitants	10	32	54
Volume construit	1 400 m ³	3 600 m ³	5 100 m ³
Volume théorique maximum de la citerne de mazout (sans système solaire)	12 000 l	22 500 l	34 000 l
	Fr.	Fr.	Fr.
Chauffage par sol et tuyauterie	7 000	25 000	40 000
Tuyauterie pour solaire	500	750	1 200
Système de réglage solaire	1 000	1 200	1 500
Stock thermique eau chaude sanitaire	2 500	5 400	7 600
Volume construit pour le stock thermique	3 400	7 000	9 900
Chaudière	5 000	10 000	15 000
Volume construit pour la chaudière	5 400	7 200	9 600
Coût d'entretien système mazout	800	2 000	2 500
Coût d'entretien système solaire	150	400	500

Figure D35b : Données des 3 maisons I, II, III utilisées pour le calcul de rentabilité.

- . en ce qui concerne le chauffage, seuls les immeubles neufs (à construire) sont à considérer et on a constaté que l'énergie solaire semble revenir plus chère que le chauffage "tout mazout" ; cet investissement constitue donc plutôt une assurance pour le futur ; mentionnons à cet égard que nos mesures dans une villa avec chauffage par dalle ont démontré qu'il est possible de couvrir 40 % des besoins annuels par l'énergie solaire (reste : mazout) avec un investissement supplémentaire inférieur à Fr. 15'000.--.
- . pour les systèmes passifs des nouveaux bâtiments, les solutions "naturellement incorporées à l'architecture" sont rentables
- . pour une maison d'exécution standard, l'isolation des bâtiments et d'autres mesures "antigasillage" sont encore plus rentables que l'énergie solaire (du moins jusqu'à un certain degré) ; en tout cas, une combinaison est toujours indiquée.
- . une autre solution utilisant la chaleur de l'air ambiant avec une pompe à chaleur (électrique ou autre) est aussi très avantageuse et pourrait diminuer le marché des chauffe-eau solaires.

5.1.3. Mesures d'encouragement

Il peut paraître paradoxal de prétendre d'une part que les énergies renouvelables ont déjà atteint ou ne sont pas loin d'atteindre le seuil de rentabilité et de réclamer d'autre part des mesures d'encouragement, qui nécessitent au moins le Scénario IIIc, ce qui reflète notre opinion.

L'explication est double :

- a) Le temps presse. Les constantes de temps caractéristiques pour le jeu du marché libre sont beaucoup trop longues dans le secteur de l'énergie, et notamment des besoins légitimes et peu compressibles en chauffage et en énergies artisanale et industrielle, par rapport aux délais dans lesquels de graves crises et des chantages politiques énergétiques nous menacent.
- b) Si la rentabilité des installations solaires est près d'être atteinte dans un calcul des frais totaux, englobant coût d'investissement et d'exploitation, cette évaluation, qui est correcte, n'est malheureusement pas courante chez les maîtres de l'ouvrage. Ils cherchent plutôt à réaliser une plus-value à court terme, les frais d'exploitation faisant l'objet d'une comptabilité séparée.

Mentionnons encore que chaque mesure visant à réaliser un comptage et une facturation correctes de l'énergie consommée est avantageuse pour la promotion de l'énergie solaire, puisque chacun aura alors de meilleures motivations à consentir des investissements de substitution ou d'économie.

5.2. Potentiel "antichômage"

5.2.1. Economie intérieure

Le chiffre d'affaire réalisable pour des installations et des équipements solaires en Suisse peut atteindre entre 100 et 1000 millions par année. Comparé à l'ensemble des branches de la construction, ce chiffre est moyen ; on ne peut donc pas pallier à une grave crise de chômage par l'énergie solaire. Néanmoins l'utilisation de cette énergie peut atténuer considérablement le chômage dans certaines branches, le nombre d'heures de travail nécessaire étant élevé et les petites et moyennes entreprises pouvant aussi être mises à contribution. Il convient toutefois de souligner que la fabrication des composants (capteurs, accumulateurs, cellules photovoltaïques) se fera, pour des raisons de coût, de plus en plus en grandes séries et dans un nombre restreint d'entreprises de taille considérable. Les branches bénéficiant de l'essor solaire seraient donc surtout celles touchant à l'installation et au montage.

5.2.2. Produits d'exportation

En héliotechnique, il faut distinguer les applications de haute et de moyenne technologie. Pour cette dernière, les produits d'exportation sont exclus, la fabrication locale étant la règle. Pour la haute technologie par contre, toute une gamme de produits bien adaptés aux possibilités de l'industrie suisse sont envisageables (vente de systèmes et de leur régulation ; chaudières solaires, héliostats ; installations de thermochimie, de photolyse ou de photovoltaïsme).

6. RAPPORTS ANNEXES ET PUBLICATIONS

SECTION 2.1.

- [1] J.-B. GAY : Données d'ensoleillement pour la région lémanique.
Energie Solaire 3, 21. 1978.
- [2] J.-B. GAY et A. FAIST : Influence des vitrages et des murs dans le bilan thermique saisonnier d'une construction.
Helvitia Physica Acta 52, 67. 1979.
- [3] A. FAIST et J.-B. GAY : Le concept de capteur solaire semi-transparent à air. EPF-L - Laboratoire de Physique Théorique. Lausanne, 1977.
- [4] A. FAIST et J.-B. GAY : Passive solar wall collectors.
International Symposium Workshop on Solar Energy. Le Caire. Juin 1978.
- [5] L. BONVIN, G.-R. PERRIN, A. RAZAFINDRAIBE et A. FAIST : Modélisation d'une serre. Premier symposium sur la recherche et le développement en énergie solaire en Suisse. Ecublens, 2 juillet 1979.
- [6] A. FAIST : Mesures passives de captage et de conservation de l'énergie solaire dans l'habitat. Symposium SSES V. Neuchâtel, 5 octobre 1977.
- [7] A. FAIST : Le chauffage d'habitations à l'énergie solaire en Suisse. Méthode simplifiée pour dimensionner la surface de capteurs.
Revue Polytechnique N° 1359. Mars 1977.
- [8] Elément de façade comportant un capteur d'énergie solaire.
Brevet N° 015 977/76.
- [9] Capteur solaire. Brevet N° 2582/77.
- [10] Capteur solaire. Brevet N° 6909/78.
- [11] Double vitrage sélectif. Brevet N° 10 338/78-3.
- [12] A. FAIST, J.-B. GAY : Captage de l'énergie solaire en façade. Mars 1978.
- [13] A. RAZAFINDRAIBE : Equation du temps. Juillet 1978.
- [14] G.-R. PERRIN : Programme H.P. "Ombres et angles". Août 1978.
- [15] J.-B. GAY, G.-R. PERRIN : Facteur d'efficacité d'un capteur à eau.
Août 1978.

- [16] G.-R. PERRIN : Création de "Semaines types". Octobre 1978.
- [17] G.-R. PERRIN : Optimisation solaire. Octobre 1978.
- [18] A. FAIST, G.-R. PERRIN : Estimation des performances et bilans thermiques d'un bâtiment solaire. Février 1979.
- [19] J. LISTER : R. and D. on solar energy in Switzerland. August 1979.
- [20] J.-B. GAY : Systèmes passifs - Evaluation de l'investissement énergétique. Juin 1979.

Section 2.2.

- [21] P. SUTER et J.R. MULLER, D. ROUX et B. TRIPOD : Performances d'un chauffe-eau solaire. Bulletin Technique de la Suisse Romande. 103ème année. N° 11. Pages 131 à 134. 26.5.1977.
- [22] J.R. MULLER : Comportement dynamique des systèmes solaires actifs de préparation d'eau chaude. Symposium sur la Recherche et le Développement en Energie Solaire en Suisse. EPF-L. 2 juillet 1979.
- [23] J.-R. MULLER, F. SEREY, P. SUTER : Effects of unsteadiness upon the performance of solar hot-water installations. Proc. Int. Cong. on Building Energy Management. Povo. 1980.
- [24] J.-R. MULLER : Modèle SSSITA. Rapport interne ITA. 1978.
- [25] G. CLERC : Simulation de systèmes solaires actifs. Diplôme EPF-L. Décembre 1977.
- [26] J.-R. MULLER, P. JEANJAQUET, F. SEREY : Installation solaire du collège de Gland. Rapport GRH-ITA 4-79.
- [27] M. NILSSON, C. CALATAYUD : Activités dans le cadre AIE, systèmes actifs. Rapport GRH-ITA 2-79.
- [28] C. DURAND : Calcul de l'énergie solaire incidente. Rapport GRH-ITA 3-80.
- [29] G. GOTTSCHALK, J.-R. MULLER : Conception et réalisation de la station solarimétrique EPF-L - ITA. Rapport GRH-ITA 6-80.

Section 2.3.

- [30] P. MATTHEY et J.-R. MULLER : Installation expérimentale de chauffage solaire avec pompe à chaleur (Epalinges). EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut de Thermique Appliquée. Lausanne, 1977.
- [31] C. DURAND, Ph. JUVET et J.-R. MULLER : Installation expérimentale de chauffage solaire avec pompe à chaleur (Epalinges). Caractéristiques de composantes et bilans énergétiques. EPF-L - Institut de Thermique Appliquée. Lausanne, 1979.
- [32] P. MATTHEY : Résultats obtenus avec une pompe à chaleur sur une installation solaire et en laboratoire. EPF-L - Institut de Thermodynamique. Lausanne, 1980.

Section 2.4.

- [33] P. FUMEAUX, M. ABDEL RAHMAN, P. SUTER : Study of solid-gaz-suspension used for direct absorption of concentrated solar radiation. Solar Energy, Vol. 22, pages 45 à 49. 1979.
- [34] M. ABDEL RAHMAN : Technical evaluation of gaseous suspensions of graphite for the absorption of concentrated solar radiation. Communication N° 6 de l'Institut de Thermique Appliquée. Juris Verlag, Zürich. Thesis EPF-L. 1978.
- [35] Ch. MARQUIS : Etude théorique du Wankel. Absorption directe. Essai des mises en route du Wankel. Absorption directe. Moteur Wankel à absorption directe. Résumé. EPF-L - ITA.

Section 2.5.

- [36] L. KELLER, Ph. JAVET : Etude comparative et critique des différentes possibilités de stockage de l'énergie solaire. Office fédéral de l'économie énergétique. Berne.
- [37] P. BREMER, P. LEHMANN, R. NOPPEL : Expériences avec un système de stockage de chaleur comprenant un stock latent à paraffine. VI Symposium SSES - Lucerne, 1978.

- [38] N.T. THINH, Ph. JAVET : Stockage de l'énergie thermique par chaleur latente de fusion en milieux biphasiques agitables. Part. 1 : Suspension de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dans l'eau. Publication en préparation.
- [39] N.T. THINH : Etude de la formation de l'émulsion de $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ dans l'huile minérale. Rapport N° 1 NTT. Institut de Génie Chimique. Janvier 1978.
- [40] N.T. THINH : Etude de corrosion pour milieux de stockage contenant du $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$. Rapport N° 3 NTT. Institut de Génie Chimique. Sept. 1979.
- [41] Rapport Fonds National intermédiaire pour la période 1.1.77 - 31.12.77.
- [42] E. RAETZ : Etude de transfert de chaleur dans un milieu de stockage latent biphasé. Travail de diplôme chimie. 1978.
N.T. THINH : Etude du transfert de chaleur à l'échelle pilote. Rapport N° 2 NTT. Institut de Génie Chimique. Janvier 1979.
- [43] N.T. THINH : Etude de transfert de chaleur d'un four tournant. Rapport N° 4 NTT. Institut de Génie Chimique. Octobre 1979.
- [44] Rapport Fonds National intermédiaire complémentaire pour la période 1.1.77 à 31.12.77.
- [45] L. KELLER, R. NOPPEL : Caractéristiques physiques et chimiques des paraffines de point de fusion voisin de 60°C . Institut de Génie Chimique. Rapport interne du 9 mars 1976.

Section 2.6.

- [46] A. GARNIER : 1 maison solaire - 30 solutions. Projets choisis et présentés par A. Garnier. Ed. Georgi, St. Saphorin, 140 pages, 1979.
- [47] A. GARNIER, Ph. EICHENBERGER et J. CSILLAGHY : La rentabilité du chauffage solaire. Bulletin technique de la Suisse romande, N° 9. 28.04.1977.
- [48] J. CSILLAGHY et A. GARNIER : Energie solaire : quelle priorité ?. Bulletin technique de la Suisse romande, N° 20. 29.09.1977.
- [49] A. GARNIER : Energie solaire - vers une nouvelle architecture ?. Annuaire 79 de la Société d'art public, pages 2 à 11.

- [50] M. ANTIPAS-SCHMID : Concours pour une villa solaire à Yverdon.
Journal de la SSES (Société Suisse pour l'Energie Solaire), N° 2.
Mai 1979.
- [51] J. CSILLAGHY : Aspects financiers du chauffage solaire.
In : Techniche moderne di Sfruttamento dell'energie nella costruzione.
Dipartimento Ambiente. Lugano, 1979.
- [52] A. GARNIER : Architecture et économies d'énergies. Revue d'habitation
N° 7/8, pages 12 à 21. 1979.
- [53] J.-P. MARGUERAT : Perspectives et problèmes économiques du développe-
ment de l'énergie solaire en Suisse. Dans La recherche et le dévelop-
pement en énergie solaire en Suisse. Editions de l'EPF-L. Ecublens.
7 pages. 2 juillet 1979.
- [54] J. CSILLAGHY : La rénovation des immeubles de construction récente :
une des clés des économies d'énergie. Habitation N° 7/7. p. 19.
Juillet/août 1979.
- [55] J.-P. MARGUERAT : Les installations solaires dans le canton du Tessin.
Dans Energie solaire N° 5. Novembre 1979.
- [56] A. GARNIER : L'inventaire architectural du Canton de Vaud : Annuaire
1978 de la société d'art public, section vaudoise du Heimatschutz.
Mai 1978.
- [57] A. GARNIER, Cl. GRIN (IREC), P. CHICHE, M. HERZEN (Chaire de Construc-
tion). Directeurs : J. CSILLAGHY (IREC), G. VAN BOGAERT (Chaire de
Construction) : Architecture solaire et législation en matière de
construction. Cahier N° 18. 281 pages. EPF-L. 1979.
- [58] J.-P. MARGUERAT, A. BOELLA. Directeur : J. CSILLAGHY : Inventaire et
analyse des installations solaires dans le Canton du Tessin.
Cahier N° 19. 202 pages. 1979.
- [59] M. ANTIPAS-SCHMID et P. BRINER. Directeur J. CSILLAGHY : Etude des
possibilités de l'énergie solaire dans le Canton de Vaud. N° 6.
233 pages.
- [60] A. GARNIER, Cl. GRIN. Directeur : J. CSILLAGHY : Evaluation des amé-
liorations énergétiques du parc immobilier vaudois.

- [61] J.-P. MARGUERAT, A. GARNIER, Ph. EICHENBERGER, P. NUESCH. Directeur : J. CSILLAGHY : Stratégie financière pour le chauffage par l'énergie solaire et ses effets socio-économiques. EPF-L - IREC. Lausanne, 1976.
- [62] A. GARNIER, P. EICHENBERGER. Directeur : J. CSILLAGHY : Potentialités des systèmes solaires actifs en Suisse. EPF-L - IREC. Lausanne, 1978.
- [63] J. CSILLAGHY : Energie, économie et société. EPF-L - IREC. Lausanne, 1980.
- [64] M. ANTIPAS-SCHMID, Cl. GRIN. Directeur : J. CSILLAGHY : Possibilités de l'énergie solaire - Canton de Berne. EPF-L - IREC. Lausanne, 1981.

E. MODELISATION

1. OBJECTIFS ET MOYENS MIS EN OEUVRE

1.1. But de la Modélisation

La crise du pétrole de 1973 a révélé que l'approvisionnement en énergie des pays occidentaux constituait un maillon très fragile de leur système socio-économique. Du coup, l'importance du rôle de l'énergie dans la vie économique a été plus fortement mise en évidence. Cette prise de conscience est à l'origine des études visant à une meilleure compréhension des mécanismes techniques et économiques qui régissent la production et la consommation d'énergie. Le but de ces études doit être de fournir un instrument d'aide à la décision en matière de choix de stratégies énergétiques. Dans cette optique, il convient en premier lieu de repérer ces mécanismes de façon claire, et de développer des modèles les décrivant en faisant appel aux sciences de l'ingénieur.

L'application des résultats de cette recherche de base permet de préciser quelles pourraient être les conséquences des mesures envisageables en matière d'énergie.

1.2. Description du système énergétique étudié

Le système énergétique devrait englober tous les aspects ayant trait à l'énergie. Il devrait en particulier inclure une partie importante des systèmes socio-économique et de l'environnement, afin de considérer tous les mécanismes régissant la production et la consommation d'énergie. Les études nécessaires pour atteindre cette globalité dépassaient largement le cadre du P.E. ENERGIE.

Le système énergétique a en effet de nombreuses interactions avec les autres systèmes : les choix énergétiques ont de grandes répercussions sur la structure économique (investissements, coûts, consommation, demande) et, réciproquement, le prix des agents énergétiques et les coûts des biens d'équipement ont des effets sur les choix énergétiques. De même, le système énergétique est responsable d'une part importante des impacts de l'activité humaine sur l'environnement et, à l'inverse, de l'environnement dépend en partie la demande d'énergie (conditions climatiques).

Il a donc fallu limiter toutes les interactions entre ces systèmes et le système énergétique à quelques mécanismes.

Pour cela, l'approche par scénarios économiques a été retenue pour estimer plusieurs scénarios de demande d'énergie (§ 6.2.). De plus, une description du système énergétique en termes économiques (investissements, effets des prix de l'énergie, coûts de production) et une évaluation des impacts sur l'environnement a été effectuée sous forme d'indicateurs. Cela a permis la mise en évidence des principales liaisons du système énergétique avec les autres systèmes.

Le système énergétique étudié ne comprend en conséquence que les mécanismes techniques de production et de consommation d'énergie, que cette dernière soit directe ou indirecte (§ 4).

Son analyse conduit à définir les sous-systèmes suivants :

- . l'exploitation des ressources indigènes et l'importation d'agents énergétiques en Suisse
- . les transformations centralisées telles que le raffinage du pétrole et la production d'électricité dans des centrales thermiques et nucléaires
- . la distribution des agents énergétiques aux consommateurs
- . les transformations décentralisées chez les utilisateurs (capteurs solaires, pompes à chaleur, voitures, réfrigérateurs, ...)
- . les prestations fournies par cette utilisation.

Le système énergétique ainsi défini peut être étudié à l'aide de deux modèles : un modèle de production englobant les quatre premiers sous-systèmes, et un modèle de la demande représenté par le dernier sous-système. Dans le cadre du P.E. ENERGIE, seul le premier modèle a fait l'objet de recherches. L'approche par scénarios économiques a remplacé le deuxième ainsi qu'il l'a été indiqué auparavant.

1.3. Choix du modèle

1.3.1. Objectifs du modèle de production

Le modèle de production a été appliqué à la Suisse et comprend les trois aspects suivants (Réf. 1) :

- . caractérisation des éléments du système (technologies énergétiques) du point de vue de leurs performances techniques, de leur coût ou des émissions dans l'environnement

- . génération de scénarios énergétiques, c'est-à-dire choix de différentes combinaisons de technologies aptes à satisfaire une demande future donnée d'énergie, pour la Suisse
- . synthèse des informations décrivant les scénarios énergétiques générés et leurs impacts sur d'autres systèmes (économie, environnement).

Le traitement de ces aspects permet d'atteindre les objectifs du modèle qui sont :

- . de décrire des scénarios énergétiques générés selon différents critères de choix, pour une demande d'énergie donnée
- . de montrer l'influence de différents scénarios de la demande, par exemple sur la demande en énergie primaire
- . de décrire les impacts sur l'économie (investissements et coûts d'exploitation) et sur l'environnement (émissions diverses) des scénarios énergétiques générés
- . de permettre des études de sensibilité ; il est par exemple possible d'évaluer l'effet d'un doublement du prix du pétrole sur la demande en énergie primaire.

A cet effet, nous avons développé le modèle RETINE (§ 3).

Partant d'une demande future donnée d'énergie et d'un ensemble de technologies dont les caractéristiques sont réunies dans la banque de données CARTEN (décrite au § 2), le modèle RETINE permet de générer des scénarios énergétiques, selon différents critères de choix et de faire la synthèse des informations décrivant les scénarios ainsi générés.

Parmi les critères utilisés, nous avons notamment défini un rendement tenant compte de l'énergie investie dans les matériaux et dans la construction des technologies ; la méthode de calcul de ces rendements, basée sur les contenus énergétiques des biens et services, est décrite au § 4.

La principale nouveauté du modèle RETINE est de pouvoir générer et décrire une grande gamme de scénarios énergétiques très différenciés les uns des autres selon les critères de choix, représentant parfois des solutions extrêmes. Le modèle convient particulièrement bien pour décrire des scénarios énergétiques possibles, à moyen et à long terme.

Grâce à la transparence des données et des résultats (peu ou pas de contraintes sur le système) et grâce à la synthèse des informations qui découlent des scénarios générés, le modèle constitue une instrument d'aide à la décision (et non pas un instrument de prévision !).

Des exemples d'application sont présentés au § 5 : ils montrent la variété des possibilités du modèle.

1.3.2. Description du modèle

L'analyse du système énergétique n'est possible que par l'intermédiaire d'un modèle donnant une représentation claire des étapes successives de transformation, de transport et de stockage d'énergie (Réf. 2). La succession de ces étapes forme des chaînes énergétiques; entre l'extraction et l'utilisation. Ces chaînes énergétiques interconnectées constituent un réseau énergétique qui peut être décrit par un graphe.

Les quantités d'énergie annuelle (ou puissances moyennes) reçue et fournie par les technologies constituant le réseau énergétique de la Suisse peuvent être déterminées à partir des statistiques de consommation d'énergie moyennant quelques hypothèses.

Les technologies énergétiques entrant dans la constitution du réseau sont décrites à l'aide de caractéristiques spécifiques rapportées à des puissances moyennes ; ces dernières se trouvent dans la banque de données CARTEN.

Pour une future demande connue d'énergie, l'emploi d'un modèle mathématique permet de déterminer, selon les différents critères de choix, les puissances moyennes fournies par les technologies, tout au long du réseau. Ce dernier peut être modifié par l'introduction de nouvelles technologies.

Le modèle RETINE distribue les puissances moyennes dans le réseau, proportionnellement à une combinaison donnée de caractéristiques des technologies appelée attractivité (critère de choix), de manière à satisfaire la demande donnée.

Il est possible d'introduire dans le réseau des contraintes de puissance moyenne maximale ou minimale, au niveau de chaque technologie (mais non au niveau du système global). Le nombre de ces contraintes devrait être limité au strict minimum pour garder la transparence du modèle.

Cette méthode est destinée à favoriser la diversification en utilisant chaque ressource ou équipement proportionnellement à son attractivité. Par opposition, la programmation linéaire ne choisit que les équipements les plus performants, compte tenu des contraintes imposées (Réf. 10, 11).

1.3.3. Données du modèle

La banque de données CARTEN regroupe les caractéristiques des technologies énergétiques (coûts, investissements, émissions, etc).

Le modèle RETINE étant destiné à décrire des scénarios énergétiques à moyen et à long terme, il est nécessaire d'évaluer la demande d'énergie correspondante. Cette demande d'énergie découle de scénarios qui regroupent les hypothèses extérieures au modèle. Plusieurs scénarios économiques peuvent ainsi être définis, ayant des incidences différentes dans le système énergétique.

Etant donné les difficultés rencontrées par le volet CONSOMMATION pour évaluer une demande d'énergie future, nous nous sommes basés sur les travaux de la GEK (Réf. 12). Ceux-ci offrent un éventail de scénarios, avec une grande diversité de tendances et d'objectifs économiques ou politiques. Ils permettent également la génération d'autres scénarios applicables au modèle (§ 5.2.).

Les limites d'implantation correspondantes des technologies sont introduites sous forme de contraintes (§ 5.1.).

Finalement, les prix des agents énergétiques sont des facteurs déterminants des scénarios de la demande.

1.3.4. Résultats du modèle

Pour chaque scénario de la demande, le modèle donne différentes répartitions des puissances moyennes dans les technologies, en fonction de l'attractivité. Les pertes énergétiques, les demandes d'énergie primaire, intermédiaire, utile peuvent être calculées pour chaque scénario. En particulier, le rendement global du système est défini par le rapport énergie utile / énergie primaire.

Les caractéristiques du réseau sont condensées sous la forme d'indicateurs tels que la somme des investissements nécessaires au système énergétique ou les émissions dans l'environnement (CO_2 , SO_2 , particules, chaleur, etc). Ces profils de caractéristiques représentent donc les impacts des scénarios énergétiques sur les autres systèmes. Ainsi, les émissions dans l'environnement, dont les effets sont étudiés par le volet ENVIRONNEMENT, changent selon le scénario.

1.3.5. Limites et extensions possibles du modèle

Les interactions du système énergétique avec le système socio-économique apparaissent dans le modèle de manière exogène : il n'y a pas de rétroaction entre ces deux systèmes (Réf. 13). Par contre, il y a interactions entre le système énergétique de l'environnement (voir p. 184 et 225).

En particulier, sur le plan économique, la possibilité de financer les investissements devrait être vérifiée pour chaque scénario, au même titre que les impacts sur la structure économique (réduction de la consommation à PNB égal, variation des prix de l'énergie et donc des autres biens produits, influence sur le niveau des importations et des exportations, etc). Une approche de ces problèmes est rendue possible par le concept de contenu énergétique (§ 4).

Les coûts de capital des technologies énergétiques ainsi que les prix sont introduits actuellement comme données dans le modèle.

Les substitutions au niveau des technologies d'utilisation dans le domaine résidentiel ou l'industrie n'apparaissent que par l'intermédiaire de la demande d'énergie utile.

Le modèle actuel est de type statique. Or, les caractéristiques du système énergétique (les technologies, les demandes, les prix des agents énergétiques) évoluent dans le temps, en connexion avec le niveau d'implantation des technologies, leur saturation et l'inertie du système économique.

Finalement, le modèle actuel ne permet ni de traiter le problème de la disponibilité (problème des pointes de consommation, des puissances installées et dimensionnement des réseaux et des stocks), ni celui de la régionalisation (réseaux de distribution électrique, de gaz, de chauffage à distance, etc).

Ces différentes remarques montrent que des extensions du modèle sont souhaitables. Parmi elles peuvent être mentionnés :

- . développement d'un modèle de la demande pour les différents secteurs économiques (transport, résidentiel, industrie, commerce et artisanat)
- . couplage avec un modèle économique permettant notamment de vérifier les investissements nécessaires dans le système énergétique et d'évaluer leur répercussion sur le plan économique (par exemple, le prix de production des capteurs solaires dépend de la quantité produite ; la structure de la demande industrielle risque d'être modifiée à la suite d'une intense production de capteurs solaires).

Un couplage avec l'économie devrait permettre également de calculer les coûts des technologies en fonction de paramètres tels que la variation des taux d'intérêt et des durées de vie, l'introduction de taxes, etc.

- . extension du couplage avec l'environnement, par exemple de manière à pénaliser les technologies les plus néfastes pour l'environnement (technologies les plus polluantes)
- . dynamisation du modèle compte tenu des aspects précédents
- . traitement du problème de la disponibilité devant permettre d'évaluer les pointes de consommation, les puissances installées et de dimensionner les réseaux et les stocks. Les données du modèle, à savoir les demandes d'énergie et les ressources d'énergie primaire (hydraulique, solaire, etc) doivent alors être évaluées dans le temps (par exemple quart d'heure par quart d'heure) et non plus en valeurs moyennes annuelles
- . régionalisation du modèle, c'est-à-dire évaluation de la demande en fonction de données régionales (climat, type d'habitations, degré d'industrialisation) et prise en compte des problèmes de connection aux réseaux de distribution existants (électrique, de gaz ou de chauffage à distance).
Finalement, évaluation des potentiels de raccordement à des réseaux à créer (par exemple, réseaux de distribution de chaleur de récupération, à basse température).

2. BANQUE DE DONNEES CARTEN

2.1. But ; sources de données

La banque de données CARTEN (Réf. 3) a pour but la description des principales technologies énergétiques utilisées en Suisse ou susceptibles de l'être dans un proche avenir.

CARTEN doit permettre la circulation d'informations dans un cercle aussi large que possible de personnes intéressées par les problèmes de l'énergie. Sa structure a été également conçue de manière à permettre l'élaboration d'un réseau énergétique : le programme RETINE utilise directement les données de CARTEN.

CARTEN a été créé à partir du langage de programmation INFOL (INFormation Oriented Language) développé aux USA à la fin des années 60 (Réf. 14) ; ce langage est orienté vers le stockage et la recherche d'informations.

Chacune des technologies répertoriées est décrite dans une fiche descriptive par une cinquantaine de caractéristiques économiques, techniques et émissions spécifiques dans l'environnement. De nombreuses sources ont été utilisées : ouvrages spécialisés d'économie énergétique, revues techniques, statistiques officielles, indications de fabricants ; ces sources sont mentionnées dans la colonne de références prévue à cet effet dans la fiche descriptive. Un certain nombre de caractéristiques ont été calculées à partir d'hypothèses mentionnées dans les commentaires.

Les technologies ont été réparties en trois grands groupes :

- . technologies de transformation d'énergie (centrales électriques, centrales combinées, système de chauffage, etc)
- . technologies de transport d'agents énergétiques
- . technologies de stockage d'agents énergétiques.

A titre d'exemple, la figure E1 montre la technologie N° 100 "Centrale hydro-électrique à accumulation".

Dans le but de calculer le rendement 4 par la méthode du coût énergétique, il est nécessaire de décomposer l'investissement suivant les secteurs industriels contribuant, par leur production, à la réalisation de la technologie (§ 4). La figure E2 montre la décomposition en 9 secteurs économiques pour la technologie N° 100, "centrale hydroélectrique à accumulation"

2.2. Description des principales caractéristiques

Puissance installée	P	MW	Puissance maximale de la technologie. C'est la puissance pour laquelle la technologie a été dimensionnée. . Pour les technologies de transport, la puissance installée est donnée par le rapport entre l'énergie transportée par transport et la durée de transport. . Pour les technologies de stockage, la puissance installée est donnée par le rapport entre l'énergie stockée par stockage et la durée du stockage.
---------------------	---	----	--

29/JUN/1979

PROGRAMME CARTEN - IPEN

NUMERO DE LA TECHNOLOGIE
NOM DE LA TECHNOLOGIE

100

CENTRALE HYDROELECTRIQUE A ACCUMULATION
(Y.C. LAC DE RETENUE)

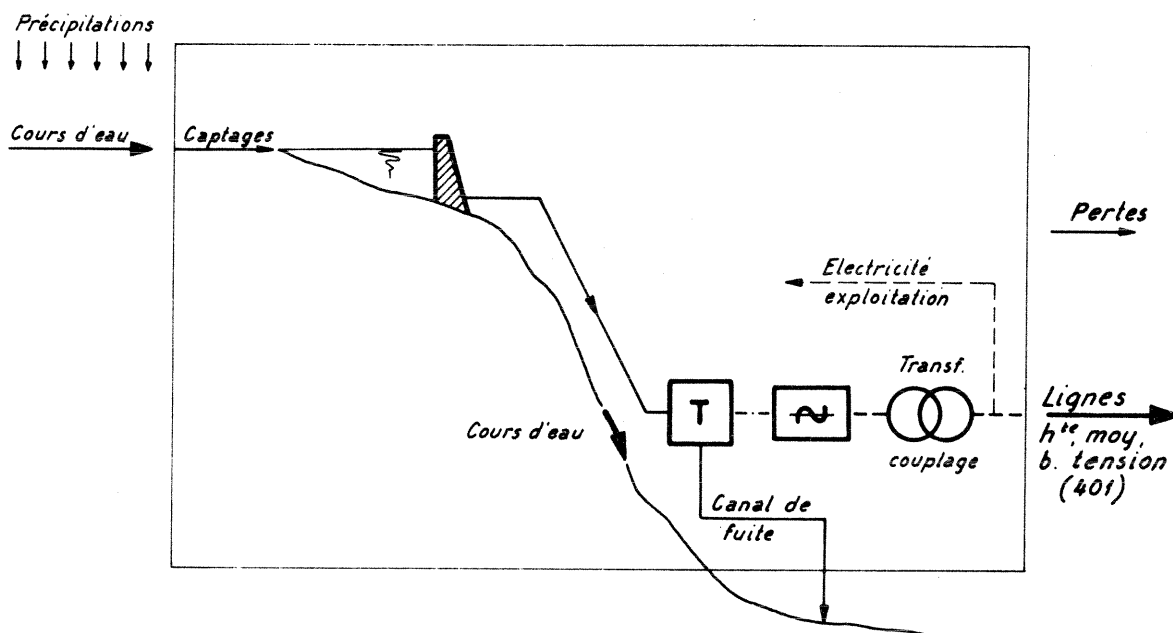
ENERGIES ENTRANTES
ENERGIES UTILES SORTANTES
PUISSANCE INSTALLEE DE REFERENCE
DATE DE LA VERSION

FAU (PREC. EN MONT.) * ELECTRICITE
ELECTRICITE
240 MWE
26/JUN/1978

TABLEAU DES CARACTERISTIQUES DE LA TECHNOLOGIE

DESCRIPTION	VALEUR	UNITE	REFERENCES	EQUALITE
---EXPLOITATION---				
I TAUX D'UTILISATION (TU)	0.1940	-	I UCS	I 2
I INDISPONIBILITE PROGRAMMEE (IP)	1000.0000	I HEURES/AN	I PE-EPFL	I 3
I INDISPONIBILITE NON-PROGRAMMEE (INP)	-	I HEURES/AN	I ?	I 0
I DUREE DE VIE	50.0000	I AN	I PE-EPFL	I 3
I DUREE DE PLANIFICATION	5.0000	I AN	I PE-EPFL	I 3
I DUREE DE CONSTRUCTION	10.0000	I AN	I PE-EPFL	I 3
---COUT---				
I CAPITAL SPEC. POUR PUIS. INSTALLEE UNITE	3007.0000	I FRS/KW	I PE-EPFL	I 1
I PUISSANCE MOYENNE UNITE (PU)	100000.0000	I KW	I -	I 3
I CAPITAL SPEC. POUR PUIS. MOY. UNITE (CU)	15500.0000	I FRS/KW	I BG-1589-3	I 3
I FACTEUR D'ECONOMIE D'ECHELLE (X)	0.0000	-	I BG-1589-3	I 3
I FRAIS VARIABLES SPECIFIQUES (B)	-	I FRS/KW/AN	I ?	I 0
I TAUX DES FRAIS FIXES (K1)	-	I 1/AN	I ?	I 0
I TAUX D'ANNUALISATION (K2)	-	I 1/AN	I ?	I 0
I TAUX DES CHARGES ANNUELLES (K)	0.0950	I 1/AN	I BG-1589-3	I 3
---RENDEMENT---				
I RENDEMENT 1 (R1)	0.8500	-	I BG-1589-3	I 3
I RENDEMENT 2 (R2)	0.8500	-	I PE-EPFL	I 3
I RENDEMENT EXERGETIQUE (R3)	0.8500	-	I PE-EPFL	I 3
I PUISSANCE SPECIFIQUE INVESTIE (R4)	0.7300	-	I PE-EPFL	I 3
---EMISSIONS DANS L'EAU---				
I HC	0.0000	I KG/KW/AN	I EWI10	I 1
I RADIONUCLIDES (AUTRES QUE H3)	0.0000	I E-6 CI/KW/AN	I EWI10	I 1
I H3(TRYTIUM)	0.0000	I E-6 CI/KW/AN	I EWI10	I 1
I CHALEUR	0.1760	I KW(TH)/KW	I PE-EPFL	I 3
---EMISSIONS DANS L'AIR---				
I POUSSIERES	0.0000	I KG/KW/AN	I EWI10	I 1
I SUTE	0.0000	I KG/KW/AN	I EWI10	I 1
I NOX	0.0000	I KG/KW/AN	I EWI10	I 1
I SOX	0.0000	I KG/KW/AN	I EWI10	I 1
I HC	0.0000	I KG/KW/AN	I EWI10	I 1
I CO	0.0000	I KG/KW/AN	I EWI10	I 1
I CO2	0.0000	I KG/KW/AN	I EWI10	I 1
I PB	0.0000	I KG/KW/AN	I EWI10	I 1
I ALDEHYDES	0.0000	I KG/KW/AN	I EWI10	I 1
I VAPEUR D'EAU	0.0000	I KG/KW/AN	I ?	I 1
I I-131	0.0000	I E-6 CI/KW/AN	I EWI10	I 1
I KR-85 + XE	0.0000	I E-6 CI/KW/AN	I EWI10	I 1
I CHALEUR	0.0000	I KW(TH)/KW	I PE-EPFL	I 3
---EMISSIONS-DIVERS---				
I EMPRISE TERRITORIALE	21.5000	I M2/KW	I BG-1589-3	I 3
I BRUIT	-	I EVB/KW	I ?	I 0
I DECHETS RADIOACTIFS (SANS COMB. IRRADIE)	0.0000	I E-6 CI/KW/AN	I EWI10	I 1
I DECHETS SOLIDES INERTES	0.0000	I KG/KW/AN	I EWI10	I 1
I CHALEUR (DANS LE SOL)	0.0000	I KW(TH)/KW	I PE-EPFL	I 3
I COUPEURE	-	I M/KW	I PE-EPFL	I 0
---SANTÉ---				
I MORTS PROFESSIONNELS	-	I UNIT/KW/AN	I ?	I 0
I BLESSES PROFESSIONNELS	-	I UNIT/KW/AN	I ?	I 0
I JOURS-HOMME PERDUS	-	I UNIT/KW/AN	I ?	I 0
I DESASTRE POTENTIEL A GRANDE ECHELLE	-	I ?	I ?	I 0
I PERSONNES EXPOSEES A LA RADIOACTIVITE	0.0000	I ?	I PE-EPFL	I 1
---AMELIORATIONS IMPOSEES---				
I AUGMENTATION DU COUT	-	I ?	I ?	I 0
I VARIATION DU RENDEMENT	-	I ?	I ?	I 0
---IMPLANTATION---				
I DATE DE LA COMMERCIALISATION	-	I -	I ?	I 0
I NIVEAU D'IMPLANTATION EN 1975	1.5100	I GW	I OFEF15/4/76+UCS9/76	I 2
I LIMITE SUPERIEURE D'IMPLANTATION EN 1985	1.4000	I GW	I GEK/MODAL-SPLIT+UCS	I 3
I LIMITE SUPERIEURE D'IMPLANTATION EN 2000	1.5000	I GW	I GEK/MODAL-SPLIT+UCS	I 4
I NIVEAU DE SATURATION (S7)	-	I GW	I ?	I 0
I COEFFICIENT D'INERTIE	-	I -	I ?	I 0

Figure E1 : Exemple de fiche CARTEN : Centrale hydro-électrique à accumulation



DÉCOMPOSITION DE L'INVESTISSEMENT

SECTEUR	UNITE	GRANDEUR	COUT %		QUALITE
TERRAIN					
CONSTRUCTION			35		
CONSTRUCTION MACHINES			9		
EQUIPEMENT TRANSPORT					
EQUIPEMENT ELECTRIQUE			9		
PRODUITS METALLIQUES			6		
PRODUITS NON METALL.			12		
TRANSPORT					
SERVICES (études, ass., frais)			29		
COUT INVESTISSEMENT			100		3

Figure E2 : Description de fiche CARTEN : Centrale hydro-électrique à accumulation

Puissance moyenne	Pm	kW	<p>La puissance moyenne se calcule de la manière suivante :</p> <ul style="list-style-type: none"> . Pour les technologies de transformation, par le rapport entre l'énergie fournie annuellement et le nombre d'heures annuel. . Pour les technologies de transport, par le rapport entre l'énergie transportée annuellement et le nombre d'heures annuel. . Pour les technologies de stockage, la puissance moyenne est égale à la puissance installée. <p>La puissance moyenne est aussi le produit de la puissance installée par le taux d'utilisation.</p>
Taux d'utilisation	Tu	-	<p>Rapport entre l'énergie fournie en une année et l'énergie maximale que peut fournir la technologie en une année. Tu correspondrait au rapport entre le nombre d'heures d'utilisation de la technologie et le nombre d'heures annuel si la technologie fournissait de l'énergie à la puissance installée.</p>
Taux de rétention	Tr	-	<p>Rapport entre la durée du stockage et la durée d'une année. Pour les technologies de stockage, le taux d'utilisation est admis égal à 1, ce qui signifie que le nombre de stockages annuels est de 1/Tr.</p>
Puissance moyenne unité	Pu	kW	<p>Puissance moyenne de l'unité technologique choisie comme étant représentative de la gamme des puissances actuellement mises en services.</p>
Capital spécifique pour puissance installée unité	Ci	Frs/kW	<p>Rapport entre l'investissement total de l'unité technologique et la puissance installée de la technologie choisie comme référence.</p>
Capital spécifique pour puissance moyenne unité	Cu	Frs/kW	<p>Rapport entre l'investissement total de l'unité technologique et la puissance moyenne unité. C'est donc aussi le rapport entre Ci et Tu .</p>

Facteur d'économie d'échelle	x	-	Le facteur d'économie d'échelle x permet de calculer le capital spécifique d'une unité technologique de $P_m \neq P_u$, à l'aide de la formule : Cap : $C_u / (P_m / P_u)^x$. L'investissement total d'une technologie est donc : Cap · P_m .
Frais variables spécifiques	B	$\frac{\text{Frs}}{\text{kW} \cdot \text{an}}$	Rapport entre les frais annuels en combustible et autres frais variables annuels et la puissance moyenne de la technologie.
Taux des frais fixes	K_1	-	Rapport entre les frais annuels dus aux taxes, assurances, entretien et l'investissement total.
Taux d'annualisation	K_2	-	Rapport entre les frais annuels dus aux intérêts et amortissement du capital et l'investissement total.
Coût d'exploitation spécifique	Cex	$\frac{\text{Frs}}{\text{kW} \cdot \text{an}}$	Coût d'exploitation spécifique annuel défini par la formule : $Cex = B + (K_1 + K_2) \cdot \text{Cap}$ (voir facteur d'économie d'échelle).
Rendement 1	R_1	-	Rapport entre la somme des puissances moyennes fournies et la puissance moyenne principale reçue.
Rendement 2	R_2	-	Rapport entre la somme des puissances moyennes fournies et la sommes des puissances moyennes reçues.
Rendement 3	R_3	-	R_3 est le rendement exergetique défini par L. Borel (Réf. 15, 31 à 33). Le rendement exergetique des technologies de CARTEN a été calculé dans (Réf. 4). Pour les technologies solaires combinées, il faut tenir compte de l'exergie solaire reçue (la puissance solaire provient d'une source dont la température est 5800°C).

Rendement 4	R_4	-	<p>Rapport entre l'énergie fournie par la technologie pendant sa durée de vie et la somme de l'énergie investie et des énergies reçues par la technologie pendant sa durée de vie.</p> <p>R_4 est le rendement net d'une technologie : il tient compte de l'énergie investie dans les matériaux et dans la construction de la technologie.</p> <p>La méthode de calcul, issue de l'analyse Entrées-Sorties, permet de déterminer l'énergie investie à partir de l'investissement total de la technologie ($Cap \cdot P_m$).</p> <p>Valeur moyenne admise : 20 MJ d'énergie investie par Fr. d'investissement.</p>
Emissions spécifiques	NO_x SO_x HC I_{131} KR_{85} etc	$\frac{kg}{kW \cdot an}$ $\frac{10^{-6} Ci}{kW \cdot an}$	<p>Rapport entre la quantité de polluant émise par année et la puissance moyenne de la technologie.</p>
Emprise territoriale spécifique		m^2/kW	<p>Rapport entre l'emprise territoriale et la puissance moyenne de la technologie.</p>
Bruit spécifique		EVB/kW	<p>Rapport entre l'Equivalent-Véhicule-Bruit (EVB) et la puissance moyenne de la technologie.</p> <p>L'EVB est défini en prenant l'émission limite de la voiture de tourisme comme étalon de mesure du bruit (Réf. 16).</p>

2.3. Etat actuel de la banque de données - Restrictions

● Etat actuel

- . les technologies de transformation d'énergie dans les industries sont encore peu nombreuses et incomplètes ; un grand effort devrait être fait pour pallier à ce manque de données sur les industries
- . pour les autres technologies, certaines valeurs manquent systématiquement ; il s'agit notamment des caractéristiques de santé.

● Restrictions

- . les principales caractéristiques de CARTEN s'expriment soit par unité de puissance moyenne fournie soit par unité de puissance moyenne fournie et par an (émissions diverses). Ces unités ont été choisies en vue de l'utilisation des valeurs de CARTEN par le modèle RETINE, dont l'unité de base est précisément une puissance moyenne ($k\bar{W}$, $M\bar{W}$, ...). Ainsi, il en résulte certaines difficultés lors de l'emploi des valeurs de CARTEN indépendamment de RETINE, et les valeurs semblent incorrectes si l'on ne prend pas garde aux unités (ainsi, le capital spécifique pour puissance moyenne unité ne correspond pas à la valeur habituellement connue)
- . à partir de la puissance moyenne totale donnée par RETINE (pour la Suisse) et de la puissance moyenne unité P_u , il est possible de déterminer le nombre d'unités de la technologie donnée (nombre de centrales, de capteurs, de chaudières, etc) de puissance moyenne égale à P_u , nécessaire au système énergétique. Par contre, il n'est pas possible de traiter le problème de la disponibilité, c'est-à-dire celui des pointes de consommation, et par conséquent du dimensionnement des réseaux et des stocks. En effet, aucune information n'est donnée actuellement sur la répartition de la puissance fournie dans le temps
- . les coûts indiqués dans CARTEN sont donnés en Fr. de 1975. Actuellement, aucune mise à jour des coûts n'a été effectuée et aucune information n'indique l'évolution des coûts
- . les informations sur la caractéristique "chaleur" ne font état ni des niveaux de température des rejets, ni des débits et des pressions. Par conséquent, il n'est pas possible actuellement d'évaluer le potentiel de récupération des rejets de chaleur.

3. DESCRIPTION DU MODELE RETINE

3.1. Réseau énergétique

Un réseau énergétique comprend toutes les combinaisons possibles des technologies aptes à satisfaire une demande énergétique donnée à partir des ressources disponibles en énergie primaire.

Il est défini par les caractéristiques des technologies qui le constituent et il est représenté par un graphe orienté dont les arcs symbolisent des technologies énergétiques.

Les technologies énergétiques peuvent être classées dans les trois groupes suivants :

- . transformation (centralisée ou décentralisée, y compris extraction et raffinage)
- . transport (y compris importations et exportations)
- . stockage.

Les caractéristiques de chacune d'entre elles ont été réunies dans la banque de données CARTEN.

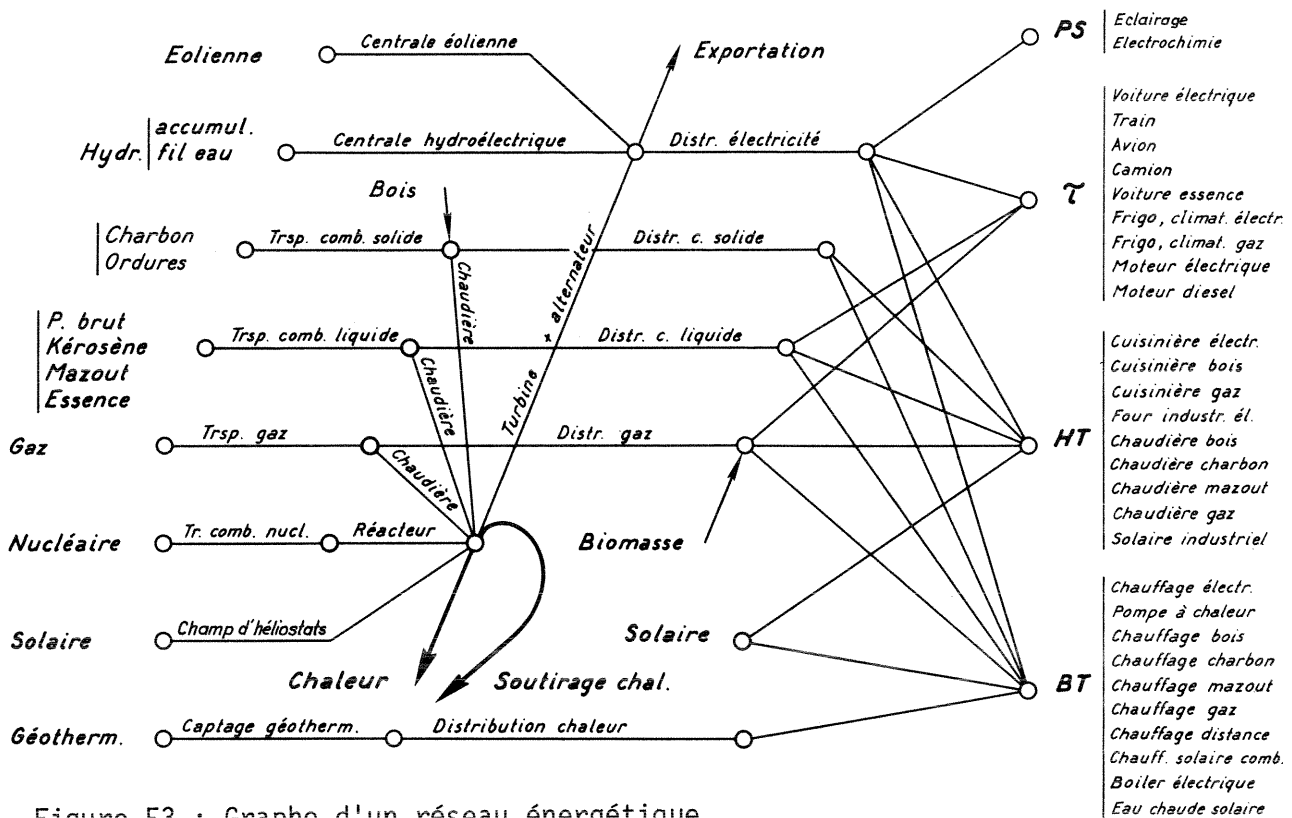


Figure E3 : Graphe d'un réseau énergétique.

Une technologie énergétique reçoit et fournit de l'énergie sous diverses formes (mazout, gaz, électricité, chaleur, etc) ; au cours de la transformation, du transport ou du stockage, une partie de l'énergie est perdue sous forme principalement de chaleur (pertes). Les quantités annuelles d'énergie reçue et fournie, ainsi que les pertes, peuvent s'exprimer en termes de puissances moyennes.

Ainsi, lorsqu'une technologie reçoit de l'énergie sous diverses formes (électricité, mazout, etc) on définit une puissance moyenne reçue principale parmi les énergies reçues, les autres étant des puissances moyennes auxiliaires.

De même, lorsqu'une technologie fournit de l'énergie sous diverses formes, on définit une puissance moyenne fournie principale parmi les énergies fournies, les autres étant des puissances moyennes sous-produit.

Par exemple, pour la technologie "chaudière à mazout", la puissance reçue principale provient du mazout, l'électricité nécessaire aux pompes et au brûleur donne une puissance auxiliaire.

Les puissances auxiliaires et les puissances sous-produits s'expriment en fonction de la puissance fournie totale (puissance fournie principale + puissances sous-produits).

Une technologie énergétique est caractérisé dans le réseau par le noeud i par lequel "transite" la puissance reçue principale (noeud origine), et le noeud j par lequel "transite" la puissance fournie principale (noeud extrémité).

Une technologie peut être représentée par le schéma ci-dessous :

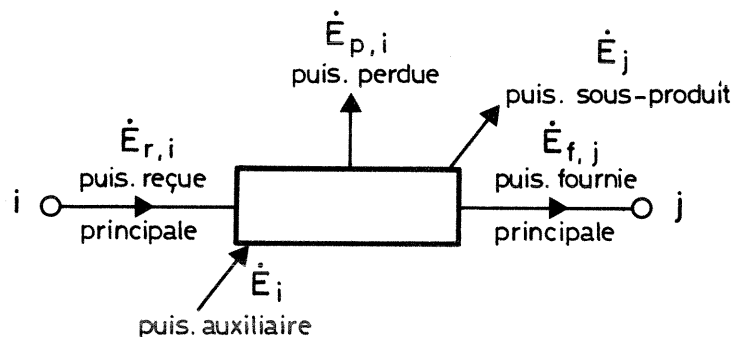


Figure E4 : Schéma d'une technologie.

Cependant, par convention de calcul, la conservation des puissances est assurée aux noeuds du réseau ; par conséquent, toutes les puissances, qu'elles soient principales, auxiliaires ou sous-produits, doivent "transiter" par les noeuds.

Ainsi, et par convention, nous représenterons une technologie énergétique par le schéma ci-dessous :

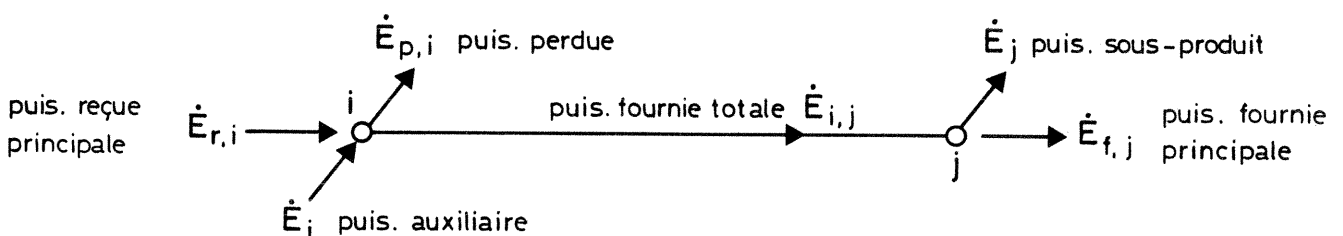


Figure E5 : Représentation d'une technologie dans un graphe.

Les relations suivantes décrivent le rendement et les puissances moyennes :

. Rendement : $\eta_{i,j} = \frac{\dot{E}_{f,j} + \dot{E}_j}{\dot{E}_{r,i} + \dot{E}_i} = \frac{\dot{E}_{i,j}}{\dot{E}_{r,i} + \dot{E}_i}$ (correspond au rendement R_2)

. Puissance perdue : $\dot{E}_{p,i} = \frac{\dot{E}_{i,j}(1 - \eta_{i,j})}{\eta_{i,j}}$

. Puissance auxiliaire : $\dot{E}_i = \frac{ta \cdot \dot{E}_{i,j}}{\eta_{i,j}}$ avec ta = taux de puissance auxiliaire

. Puissance sous-produit : $\dot{E}_j = ts \cdot \dot{E}_{i,j}$ avec ts = taux de puissance sous-produit

. Puissance fournie totale : $\dot{E}_{i,j} = \dot{E}_{f,j} + \dot{E}_j$

La puissance fournie totale d'une technologie doit être positive ou nulle, une puissance négative n'ayant aucun sens physique ; dans d'autres cas, elle peut être limitée si elle dépasse les limites d'implantation inférieure et supérieure des technologies dans le système énergétique.

Le réseau énergétique d'un pays comprend toutes les combinaisons possibles de technologies permettant de satisfaire la demande d'énergie à partir des ressources indigènes disponibles et des importations.

Suivant les cas étudiés, la demande peut se situer au niveau "énergie intermédiaire" ou "énergie utile". Elle peut se décomposer de différentes manières ; par exemple, pour l'énergie intermédiaire :

- . électricité
- . essence
- . kérosène
- . mazout
- . gaz
- . chaleur à distance

ou, pour l'énergie utile :

- . processus spéciaux (PS)
- . chaleur haute température (HT)
- . chaleur basse température (BT)
- . travail (τ).

Le graphe d'un tel réseau devient rapidement très complexe. Dans ce cas, on utilisera généralement deux représentations (graphes) du même réseau énergétique. Un graphe dans lequel apparaissent toutes les technologies, symbolisées par des arcs, un autre graphe dans lequel les arcs représentent des ensembles de technologies (sous-système) ; dans cette seconde représentation, seuls apparaissent les noeuds des différentes chaînes énergétiques (ensemble de technologies allant d'une ressource à une demande d'énergie). Les méthodes de calcul développées sur ordinateur sont basées sur une telle représentation par "sous-systèmes".

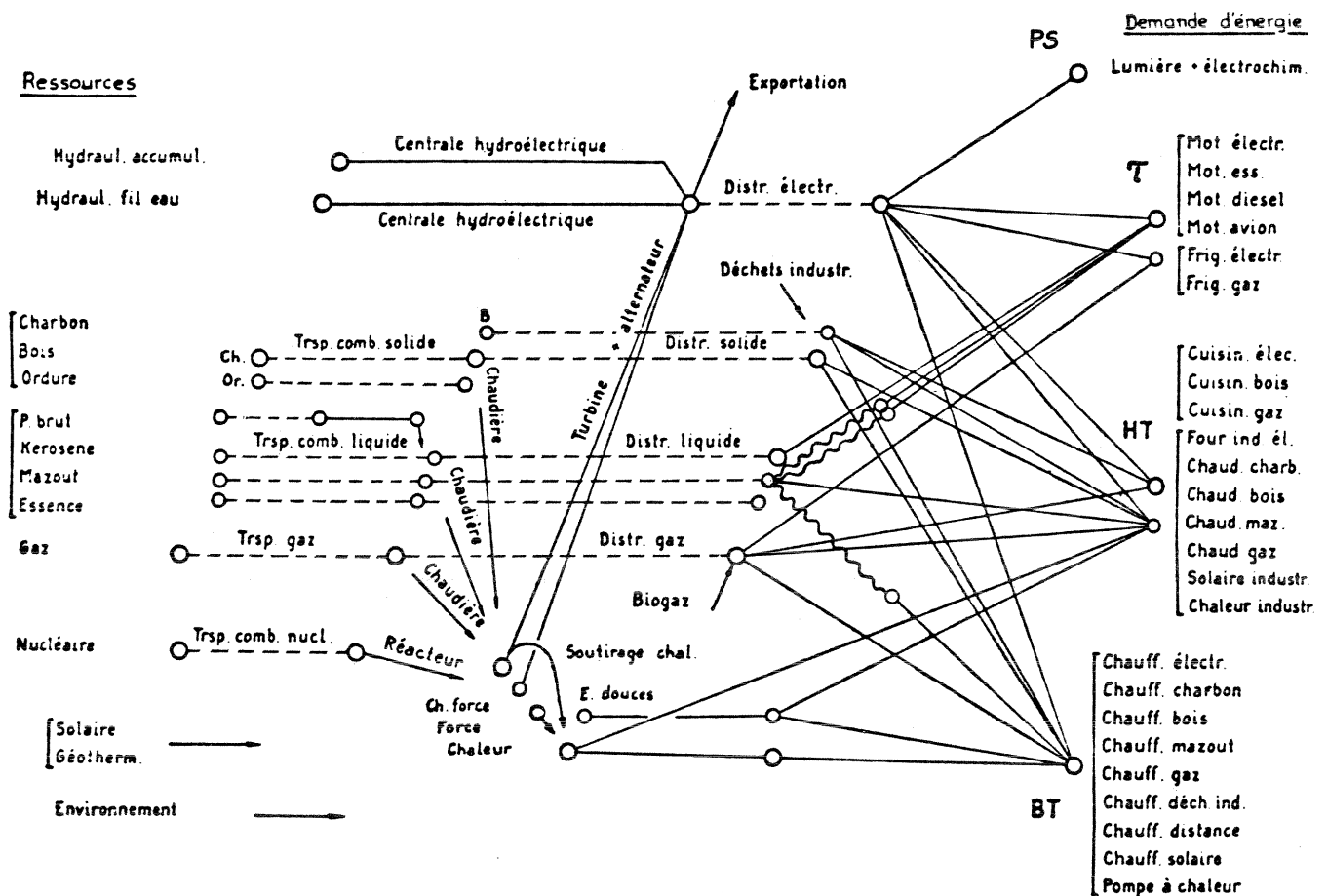


Figure E6 : Graphe d'un macro-réseau énergétique.

Chaque arc du macro-réseau peut à son tour être représenté par un graphe : c'est un sous-réseau.

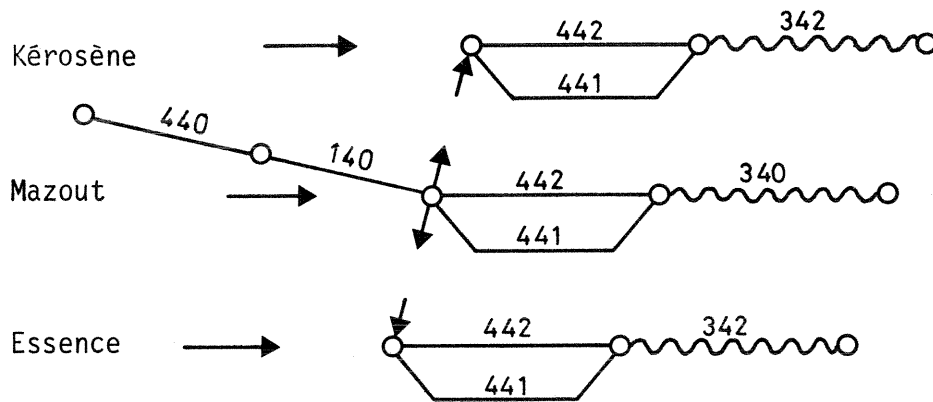


Figure E7 : Graphe du sous-réseau "Transport de combustibles liquides".

- 440 Oléoduc pour pétrole brut
- 140 Raffinerie
- 442 Transport des produits pétroliers par chemin de fer
- 441 Transport des produits pétroliers par camion
- 342 Stockage de l'essence
- 340 Stockage de l'huile de chauffage

3.2. Description du modèle mathématique

Le modèle mathématique permet de générer des scénarios énergétiques selon divers critères de choix : étant donné un scénario de la demande annuelle d'énergie (intermédiaire ou utile ...), le modèle répartit (affecte) les puissances dans les technologies, proportionnellement à l'attractivité des technologies, et de manière à satisfaire la demande donnée.

L'attractivité (critère de choix) est définie pour chaque technologie selon une fonction donnée de ses caractéristiques (fonction objectif) : par exemple, attractivité inversement proportionnelle aux pertes ou inversement proportionnelle au coût d'exploitation spécifique ; dans le premier cas, ce sont les technologies de meilleur rendement qui sont les plus attractives, dans le second cas les technologies de moindre coût. Pour favoriser davantage les technologies les meilleures, c'est-à-dire pour augmenter la sévérité du choix entre les technologies, l'attractivité peut être définie en élevant la fonction objectif à une puissance entière positive n appelée sévérité : ainsi, dans les exemples précédents, les pertes globales dans le système énergétique, respectivement les coûts globaux diminuent pour une sévérité croissante.

Cet algorithme de calcul est destiné à diversifier le choix des technologies en utilisant chaque technologie, proportionnellement à son attractivité, contrairement à la programmation linéaire où seules les technologies les meilleures sont choisies. D'autre part, il permet de générer des scénarios énergétiques très différenciés les uns des autres selon l'attractivité choisie (et par conséquent, pour une fonction objectif donnée, selon le degré de sévérité choisi).

Une technologie étant caractérisée dans le réseau par un noeud origine i (noeud où "transite" la puissance reçue principale) et un noeud j (noeud où "transite" la puissance fournie principale), définissons en chaque noeud du réseau une grandeur fictive P que nous appellerons potentiel. La puissance fournie totale $f_{i,j}$ (puissance fournie principale + puissances auxiliaires) est définie par la relation phénoménologique suivante :

$$\dot{E}_{i,j} = \alpha_{i,j} (P_j - P_i) \quad (1)$$

avec $\dot{E}_{i,j}$ = puissance fournie totale de la technologie de noeud origine i et de noeud extrémité j (technologie $i-j$)

$\alpha_{i,j}$ = attractivité de la technologie $i-j$

P_i, P_j = potentiels aux noeuds i et j .

Le potentiel a une signification liée à la définition de l'attractivité.

En plus des puissances fournies par les technologies à l'amont du noeud j , il peut exister des ressources supplémentaires de puissance au noeud j (puissance arrivant au noeud j) ; par exemple : importations, puissances auxiliaires, ressources données d'énergie primaire, etc. De même, outre les puissances reçues et les puissances perdues des technologies à l'aval du noeud j , il peut exister des demandes supplémentaires de puissance au noeud j (puissance partant du noeud j) ; par exemple : exportations, puissances sous-produits, demande donnée d'énergie utile, etc.

Appelons \dot{E}_j les ressources supplémentaires de puissance (\dot{E} positif) ou les demandes supplémentaires de puissance (\dot{E} négatif) au noeud j du réseau.

Le bilan des puissances au noeud j s'exprime par :

$$\sum_i \dot{E}_{i,j} + \dot{E}_j = \sum_k \dot{E}_{j,k} + \dot{E}_{p,j} \quad (2)$$

avec \dot{E}_j = demande pour ressource supplémentaire de puissance au noeud j
(par exemple, puissance auxiliaire, puissance sous-produit, importations, etc)

$\dot{E}_{p,j}$ = puissances perdues au noeud j , dues aux technologies à l'aval du noeud j

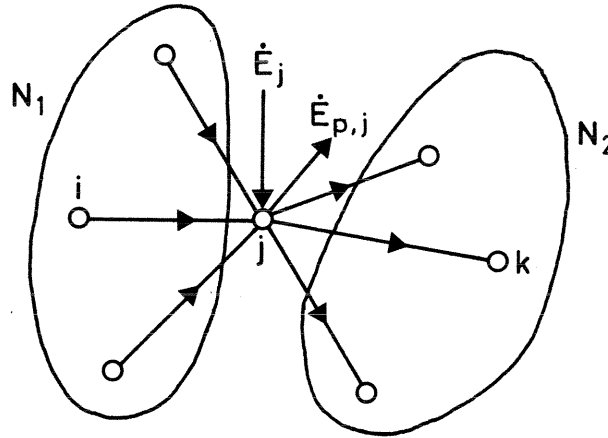


Figure E8 : Bilan des puissances au noeud j .

avec N_1 = ensemble des noeuds origine des technologies ayant pour extrémité le noeud j

N_2 = ensemble des noeuds extrémité des technologies ayant pour origine le noeud j .

La puissance perdue au noeud j est :

$$\dot{E}_{p,j} = \sum_{k \in N_2} \frac{\dot{E}_{j,k}(1 - \eta_{j,k})}{\eta_{j,k}} \quad (3)$$

avec $\eta_{j,k}$ qui peut représenter les rendements R_1, R_2, R_3 ou R_4 de CARTEN.

En additionnant les équations (2) et (3), on obtient :

$$\sum_{k \in N_2} \frac{\dot{E}_{j,k}}{\eta_{j,k}} - \sum_{i \in N_1} \dot{E}_{i,j} = \dot{E}_j \quad (4)$$

c'est-à-dire en utilisant l'équation (1), $\alpha_{i,j}$ étant l'attractivité des technologies $i-j$ et $\alpha_{j,k}$ celle des technologies j,k :

$$\sum_i \alpha_{i,j} \cdot P_i + \sum_k \frac{\alpha_{j,k}}{\eta_{j,k}} \cdot P_k - \left(\sum_i \alpha_{i,j} + \sum_k \frac{\alpha_{j,k}}{\eta_{j,k}} \right) \cdot P_j = \dot{E}_j \quad (5)$$

ou sous forme matricielle, pour la ligne j :

$$\begin{pmatrix} \vdots \\ \dot{E}_j \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dots \alpha_{i,j} \dots - \left(\sum_i \alpha_{i,j} + \sum_k \frac{\alpha_{j,k}}{\eta_{j,k}} \right) \dots \frac{\alpha_{j,k}}{\eta_{j,k}} \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vdots \\ P_i \\ \vdots \\ P_j \\ \vdots \\ P_k \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (6)$$

On obtient ainsi un système linéaire :

$$|\dot{E}| = \{K\} \cdot |P| \quad (7)$$

où K définit la matrice d'attractivité.

Pour un réseau de N noeuds, le nombre des variables est égal à $2N$, celles-ci étant les potentiels P et les demandes ou ressources de puissance E en chaque noeud. Pour que le système soit déterminé, il faut fixer N variables dont au moins un potentiel de référence, car les puissances s'expriment en fonction de différences de potentiel.

Le modèle est utilisé, dans le cadre de notre étude, de manière à satisfaire une demande annuelle donnée d'énergie intermédiaire ou utile, à l'aide des technologies et des ressources disponibles. Par conséquent, les \dot{E} sont donnés pour les noeuds où existe une demande de puissance (y compris les noeuds où les \dot{E} sont nuls), tandis que les potentiels P sont donnés pour les noeuds où existe une ressource de puissance. En ces noeuds, origine des chaînes énergétiques, les potentiels sont fixés, égaux à zéro.

Cependant, le modèle pourrait être utilisé différemment, par exemple pour déterminer la demande utile que l'on pourrait satisfaire à partir de ressources d'énergie primaire données.

La solution est donnée par $|P| = \{K\}^{-1} |\dot{E}|$; (8)
les puissances fournies totales $\dot{E}_{i,j}$ se calculent alors d'après (1).

Certaines technologies sont soumises à des contraintes, représentées par les limites d'implantation inférieure et supérieure des technologies dans le système énergétique.

On doit vérifier d'une part que les puissances fournies par les technologies soient positives ou nulles, et d'autre part qu'elles ne dépassent pas les limites d'implantation $C_{i,j,\min}$ et $C_{i,j,\max}$.

$$0 < C_{i,j,\min} < \dot{E}_{i,j} < C_{i,j,\max} \quad (9)$$

Si tel n'est pas le cas, la technologie en question est éliminée du réseau (suppression de l'arc correspondant). Le bilan des puissances aux noeuds origine et extrémité de la technologie est assuré en y ajoutant une demande ou une ressource de puissance égale en valeur absolue à la limite d'implantation dépassée. Le choix se fera alors entre les technologies restantes, toujours selon le même critère d'affectation proportionnelle.

3.3. Fonction objectif

Le choix d'une fonction objectif ψ_0 dépend de l'objectif d'un scénario énergétique. Un tel objectif sera par exemple une diminution des pertes globales dans le système énergétique, et par conséquent une diminution de la consommation d'énergie primaire, ou une minimisation des coûts de revient de l'énergie utile, ou enfin une diminution des émissions de divers polluants dans l'environnement, etc.

Il est possible également, d'un point de vue théorique, de définir un objectif global en combinant différentes caractéristiques des technologies, par exemple coûts et rendements, ou coûts et facteurs qualitatifs sur environnement, etc.

Exemples : 1) $\psi_0 = \eta = \text{rendement}$

avec $\eta = R_1$ ou R_2 ou R_3 ou R_4 de CARTEN

2) $\psi_0 = \frac{\eta}{1-\eta} = \text{inverse des pertes}$

avec $\eta = R_1$ ou R_2 ou R_3 ou R_4 de CARTEN

3) $\psi_0 = \frac{1}{C} = \text{inverse du coût d'exploitation spécifique annuel}$

avec $C = (K_1 + K_2) \text{ Cap de CARTEN}$

C représente le coût spécifique ajouté, c'est-à-dire le coût d'exploitation annuel, non compris le coût de l'énergie primaire ; celui-ci est pris en compte au début de la chaîne.

- 4) $\psi_0 = \frac{1}{C(1+S \cdot g)}$ = inverse du coût total spécifique
 avec g = index de gravité tenant compte des effets sur
 l'environnement (échelle des effets, compris entre
 0 et 5 - voir § 2.2, p. 56)
 avec S = facteur de pondération
 $C \cdot S \cdot g$ représente un coût social spécifique.

3.4. Attractivité, sévérité

L'attractivité est définie en élevant une fonction objectif donnée à une puissance entière positive n appelée sévérité :

$$\alpha_{i,j} = (\psi_0)_{i,j}^n$$

Ainsi, pour une fonction objectif donnée, toute une gamme de solutions sont obtenues en faisant varier la sévérité n de l'attractivité, et toute augmentation de n se traduit par une nouvelle répartition des puissances en faveur des technologies les plus attractives.

Dans le cas simple de deux technologies en parallèle, la répartition des puissances se rapproche de plus en plus de la répartition optimale de la programmation linéaire, pour une sévérité croissante. Cependant, dans le cas de deux technologies de même attractivité, les puissances affectées à chacune d'entre elles restent identiques quelle que soit la sévérité n .

Le diagramme de la figure E9 représente le rapport des puissances dans deux technologies en parallèle, pour une affectation en rendement ($\psi_0 = n$), en fonction du rapport des rendements des deux technologies et de la sévérité n .

Pour un réseau quelconque, une sévérité n croissante ne conduit pas forcément à la solution optimale.

Cependant, une procédure par itération a été développée, permettant de faire tendre la solution vers l'optimum.

La répartition initiale des puissances ($n=1$) est obtenue pour une attractivité $\alpha_{i,j}^{(1)} = (\psi_0)_{i,j}$ (\overline{MW} ou $k\overline{W}$...), à l'aide des équations (1) à (8).

L'attractivité pour une sévérité $n > 1$ est donnée par la formule :

$$\alpha_{i,j}^{(n)} = (\psi_0)_{i,j} \cdot \dot{E}_{i,j}^{(n-1)} \quad \text{pour } n > 1 \quad (10)$$

avec $\alpha_{i,j}^{(n)}$ = attractivité dans la technologie i-j , à l'itération de sévérité n

$(\psi_0)_{i,j}$ = fonction-objectif

$\dot{E}_{i,j}^{(n-1)}$ = puissance fournie totale de la technologie i-j , à l'itération de sévérité n-1

et la puissance fournie totale de la technologie i-j pour la sévérité n est donnée par l'équation (1) :

$$\dot{E}_{i,j}^{(n)} = \alpha_{i,j}^{(n)} \cdot (P_j - P_i)$$

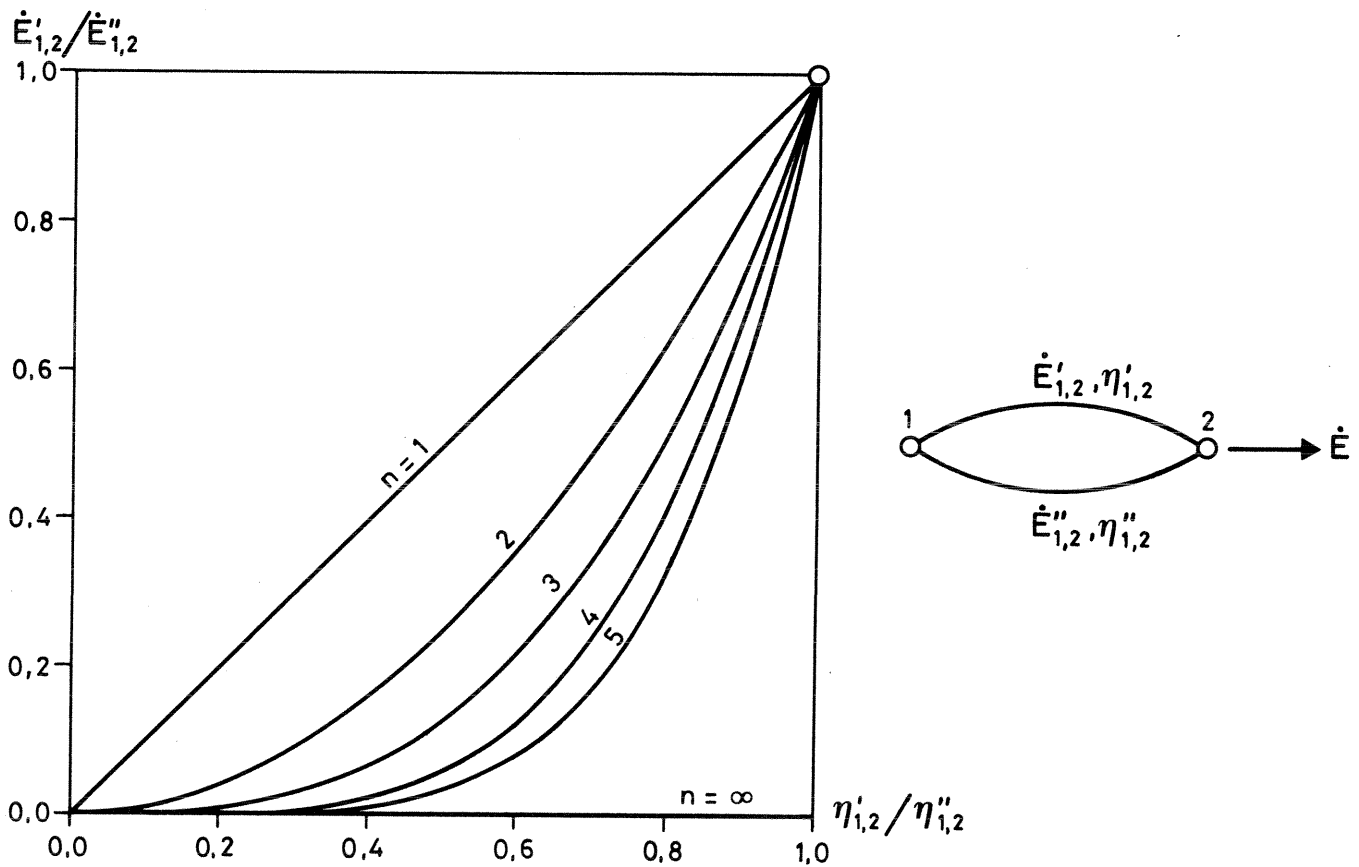


Figure E9 : Evolution des puissances en fonction de la sévérité n .

3.5. Exemple illustratif

A titre d'exemple, un réseau énergétique très simplifié est représenté par le graphe ci-dessous :

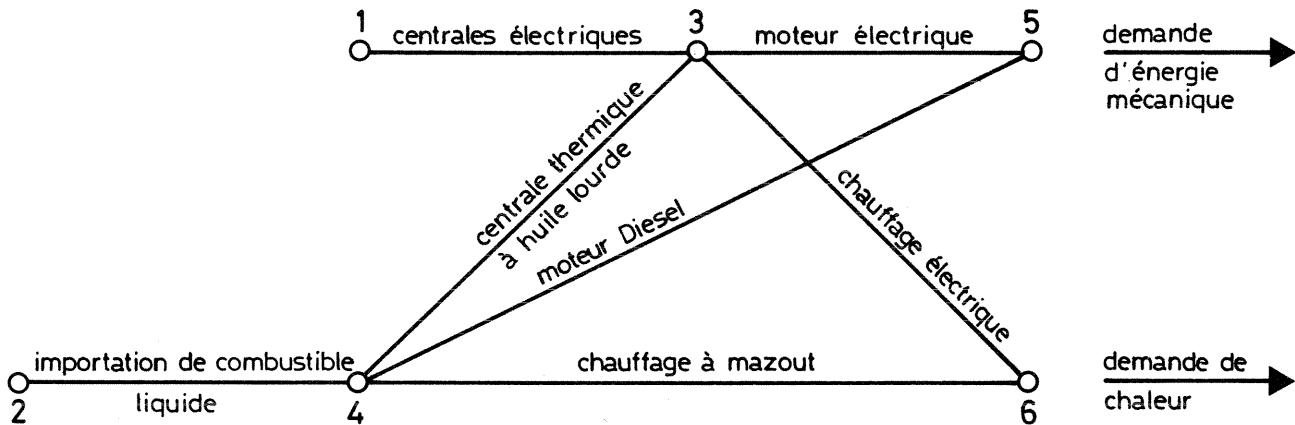


Figure E10 : Exemple de réseau.

Les caractéristiques des technologies (rendement R_2 et coût) sont données à la figure E11a .

Le sous-réseau "centrales électriques" comprend les centrales hydro-électriques et les centrales nucléaires. Les caractéristiques y relatives sont par conséquent des caractéristiques moyennes.

En particulier le coût du combustible nucléaire intervient dans le coût du sous-réseau 1-3.

Par contre, le coût du combustible liquide est introduit sur la technologie "importation".

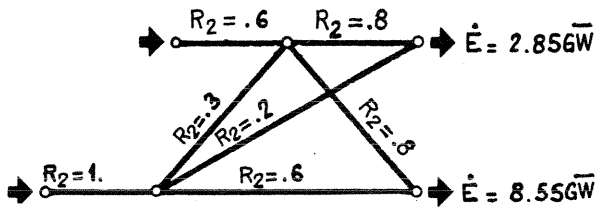
Les potentiels sont nuls à l'origine des chaînes (nœuds 1 et 2), et les demandes de puissance sont données aux nœuds 3, 4, 5 et 6 du réseau. La demande de puissance est nulle aux nœuds 3 et 4 ; elle correspond à la demande annuelle mécanique en 5 et à la demande annuelle de chaleur en 6. Ces demandes sont données en \overline{GW} .

Les résultats d'une affectation inversement proportionnelle aux pertes et d'une affectation inversement proportionnelle aux coûts spécifiques ajoutés sont présentés à la figure E11b , pour une sévérité croissante.

Dans le premier cas, la solution optimale est atteinte pour une sévérité 6, dans le second cas, pour une sévérité 30.

Exemple illustratif

Rendements (R_2 sans dimension)



Coûts (C en Fr/kW)

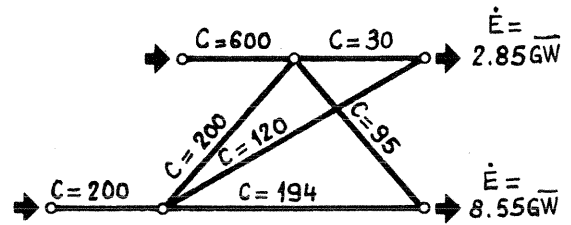
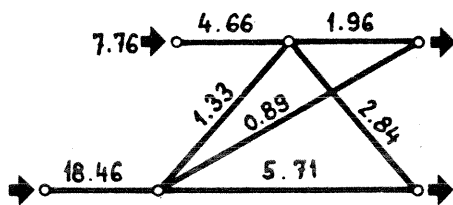


Figure E11a : Caractéristiques des technologies.

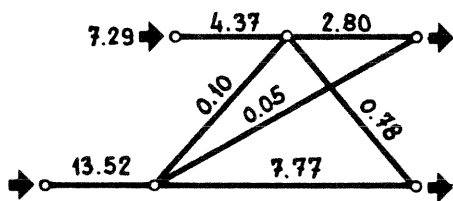
Affectation inversément proportionnelle aux pertes

Sévérité

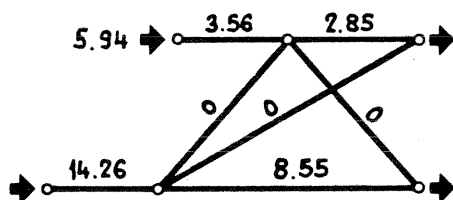
1



3



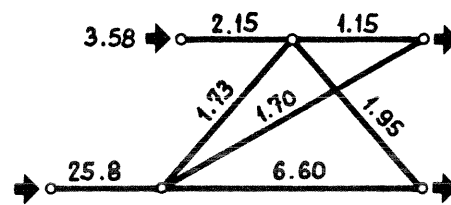
6



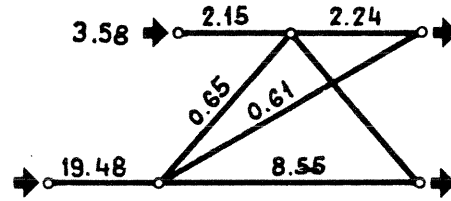
Affectation inversément proportionnelle aux coûts spécifiques ajoutés

Sévérité

1



7



30

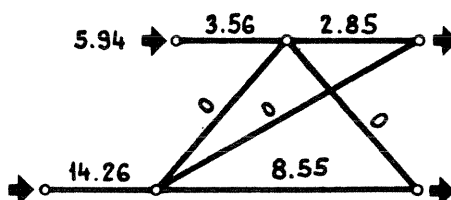


Figure E11b : Résultats (Flux en \overline{GW})

4. CONTENU ENERGETIQUE PAR UNITE MONETAIRE DE DEMANDE FINALE DES BIENS ET SERVICES EN SUISSE (1970) ET RENDEMENT NET DES TECHNOLOGIES*

4.1. Energie et investissement

L'étude de stratégies énergétiques développée aux paragraphes précédents amène inévitablement à l'étude des impacts au niveau d'autres systèmes fortement liés au système énergétique. Ainsi, les impacts sur l'environnement ont pu être décrits par le volet Environnement du P.E. ENERGIE. De même, les répercussions économiques doivent être analysées pour estimer les changements qui peuvent intervenir dans le système socio-économique et les moyens à mettre en oeuvre pour la réalisation du système énergétique. Les étroites liaisons entre consommation d'énergie et produit national, pour divers pays, indiquent en effet combien sont dépendants systèmes énergétiques et systèmes économiques (Réf. 17). Ces relations qui ne sont au premier abord que la description de situations réelles peuvent faire l'objet d'analyses plus fines afin de mieux cerner les divers phénomènes et mécanismes qui les soutiennent. Finalement, c'est la fonction de l'énergie dans tout le système économique qu'il faut étudier, c'est-à-dire sa production, sa transformation, sa distribution, sa consommation ou son utilisation à tous les stades de la vie économique, en liaison avec les différents agents économiques, leurs objectifs, la manière dont ils sont organisés et, ce qui n'est pas le moins important, l'environnement international. Le système économique est ainsi structuré et il est possible de voir ces structures sous trois aspects principaux, évidemment complémentaires :

- . structure générale du système économique : production, consommation, importations et exportations, formation de capital, etc
- . structure plus spécifique de la production, représentée par les structures industrielles et inter-industrielles
- . structure plus spécifique de la consommation privée, avec les habitudes de consommation qui la déterminent.

Nous nous attacherons surtout aux deux premiers points pour mieux comprendre ce qui se passe au niveau industriel, lequel a besoin d'énergie pour produire des biens qui seront achetés par les consommateurs privés.

* Ce paragraphe s'inscrit dans le cadre d'une thèse en préparation à l'EPFL (Réf. 6).

Nous n'analyserons pas ici la structure de la consommation privée qui sera considérée comme une donnée exogène au modèle. De même, la formation de capital sera aussi exogène, la demande finale composée de la consommation privée et de la formation de capital l'étant donc aussi.

La réalisation des investissements se manifeste par la formation de capital physique, c'est-à-dire par la réalisation de constructions, d'usines, d'équipements, etc. Le niveau d'activité de l'économie dépend fortement des investissements réalisés, donc du capital physique existant, que ce soit dans le domaine industriel (usine sidérurgique par exemple) ou dans le domaine énergétique (usine électrique). D'autre part, le coût de l'énergie dépend des investissements réalisés dans le domaine de l'énergie : c'est un critère de choix essentiel entre différentes technologies (§ 3) (Réf. 7). Les questions suivantes montrent à quel point l'investissement est un élément particulièrement sensible de l'économie, non uniquement dans le domaine de l'énergie :

- . problème des restructurations industrielles : où, comment et à quel niveau faut-il opérer des investissements ?
- . problème des importations-exportations : faut-il plus importer, où faut-il investir si l'on souhaite être moins dépendant ?

Ces deux questions qui en soulèvent bien d'autres, certes, sont particulièrement cruciales quant à la consommation d'énergie d'un pays. Par exemple :

- . toutes choses étant égales par ailleurs, importer des biens correspond à importer de l'énergie de manière indirecte et à être moins dépendant d'un approvisionnement direct en énergie. Exporter plus impliquera nécessairement une augmentation de la consommation d'énergie dans le pays, pour produire des biens, mais aussi parce que le revenu national peut croître et que le surplus sera dépensé. Une balance en énergie des importations et des exportations fournit quelques indications utiles à cet égard.
- . toutes choses étant égales par ailleurs, un investissement est consommateur d'énergie indirecte pour sa réalisation et son exploitation et aussi d'énergie induite due à l'effet multiplicateur qu'il génère. On peut dans ce sens se poser la question de la véritable valeur des investissements "anti-gaspillage" au point de vue énergétique pour l'ensemble de l'économie du moins.

- . enfin, il ne faudrait pas oublier qu'un investissement doit au premier chef être rentable sur le plan économique, si ce n'est sur le plan énergétique.

4.2. Contenu énergétique par unité monétaire de demande finale des biens et services

Les investissements ont des impacts sur le système économique qui ont principalement lieu au niveau de la production industrielle, des importations et des emplois. Ils demandent surtout des biens et services, qu'ils soient ou non importés, et de la main-d'oeuvre pour être réalisés - si l'aspect financier est laissé de côté. Ce sont ainsi des fonctions de ces éléments qui peuvent être mesurés en unités physiques (par exemple, tonnes de ciment, d'acier, hommes-années). D'autre part, une quantité d'énergie a été nécessaire pour produire ces biens et services et pour satisfaire en biens et en services les besoins des travailleurs. Tous ces biens et services ont été créés au travers des processus industriels grâce à l'énergie, distribuée dans la machine économique, et aux autres facteurs primaires (capital, travail, matières premières) qui ont été transformés. Dans le bilan énergétique global, l'énergie réapparaît donc sous forme indirecte, contenue dans les biens et services. En fin de compte, l'énergie a un rôle moteur et elle permet le déroulement du processus économique : à chaque transaction monétaire correspond une certaine quantité d'énergie contenue dans le bien ou service échangé. Au stade de la consommation privée, que l'on considérera ici comme la dernière étape du cycle économique, il y a donc une quantité d'énergie indirecte contenue dans les biens et services achetés par les consommateurs. Cette quantité d'énergie, rapportée à la valeur des biens et services achetés, permettra de définir le contenu énergétique par unité monétaire de demande finale (en incorporant la formation de capital à la consommation privée). Ce contenu énergétique s'exprime par exemple en MJ/Fr de demande finale.

Ainsi, le contenu énergétique d'un bien ou d'un service doit tenir compte de tous les produits intermédiaires conduisant à sa fabrication et pour lesquels de l'énergie a dû être ajoutée afin de les transformer. La structure industrielle doit être connue pour estimer quels sont les besoins des industries en biens et services non seulement produits par elles-mêmes mais encore par les autres industries.

Le tableau des échanges inter-industriels reflète la structure de la production d'un pays pour une année donnée.

En considérant les n biens fabriqués par les n processus industriels, la production totale du bien i , X_i , est égale à la consommation totale C_i de ce bien par tous les producteurs plus la demande finale D_i de ce bien :

$$X_i = C_i + D_i \quad i = 1, n$$

La consommation totale de ce bien i qui représente la consommation intermédiaire de toutes les industries j est telle que :

$$C_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} \quad i = 1, n$$

où C_{ij} est la consommation intermédiaire de bien i par l'industrie j . En rapportant cette consommation à l'unité produite de bien j , on obtient :

$$X_i = \sum_{j=1}^n \frac{C_{ij}}{X_j} \cdot X_j + D_i \quad i = 1, n$$

Le rapport $C_{ij}/X_j = A_{ij}$ est le coefficient technique de l'échange de bien i entre l'industrie i et l'industrie j . Il indique quelle est la part de tous les biens provenant de l'industrie i et délivrée à l'industrie j , pour satisfaire une unité de production de l'industrie j .

Pour tous les biens i , on a donc un système de n équations avec n inconnues X_i si les coefficients techniques A_{ij} et les demandes finales D_i sont connus. Ainsi, pour un vecteur de demande finale D , la production X à atteindre par toutes les industries de l'économie est, en relation matricielle, où la matrice A (ou table Entrées-Sorties) est formée de tous les coefficients A_{ij} :

$$X = (I - A)^{-1} \cdot D$$

si la matrice $(I - A)^{-1}$ existe, I étant une matrice unité. De nombreux problèmes sont soulevés lors de l'établissement de la matrice A . Ce n'est pas le lieu de discuter ici les difficultés rencontrées. Il suffit de dire que les insuffisances de données statistiques et les questions d'agrégation ne permettent pas la formation d'une matrice bien par bien (et par extension service par service) ce qui du reste serait très lourd pour le traitement.

Aussi, un certain nombre de secteurs industriels caractéristiques ont dû être définis, pour lesquels les produits fabriqués sont similaires. C'est à ce titre qu'on emploiera le terme secteur industriel et que le contenu énergétique sera plutôt celui d'un secteur que celui d'un bien ou d'un service. Cette représentation matricielle des échanges inter-industriels implique que les fonctions de valeur de production sont linéaires mais qu'elles existent pour chaque secteur, chacune intégrant les entrées de tous les autres secteurs. Cela permet le bouclage du système économique. Ce bouclage se traduit par un courant conservatif de monnaie tout au long du cycle économique, de la production à la consommation et de la consommation à la production (en raisonnant de manière statique), en considérant explicitement les structures de la production, ce qui est un avantage déterminant. Ces tables, exprimées en unités monétaires, peuvent être utilisées afin de trouver la quantité d'énergie directe et indirecte contenue par unité monétaire de chaque bien ou service, représenté par son secteur d'activité industriel, délivré à la demande finale. Ceci est rendu relativement aisé par le fait que les tables des échanges inter-industriels comportent des secteurs énergétiques comme des secteurs spécifiquement industriels. A cet égard, l'énergie est vue comme l'égal d'un bien ou d'un service et possède ainsi une valeur d'échange et un prix. En convertissant ces tables en unités énergétiques, à partir des prix de l'énergie qui est achetée par les différents secteurs, on obtient des tables décrivant les flux d'énergie tout au long du cycle de production économique. Ainsi l'énergie totale E_i produite par chaque secteur énergétique i est distribuée à tous les autres secteurs k et à la demande finale E_{Di} :

$$E_i = \sum_{k=1}^n E_{ik} + E_{Di} = \sum_{k=1}^n \left(\frac{E_{ik}}{X_k} \right) \cdot X_k + \left(\frac{E_{Di}}{D_i} \right) \cdot D_i$$

i = secteur énergétique

En combinant cette équation avec celle de la production à atteindre pour satisfaire une demande finale D , en valeur, on obtient après transformations la relation matricielle suivante (Réf. 18) :

$$E = [R \cdot (I - A)^{-1} + S] \cdot D = \epsilon \cdot D$$

où R est la table de distribution de l'énergie par unité monétaire de production et S celle de l'énergie livrée à la demande finale, par unité monétaire de demande finale. Chaque élément ϵ_{ij} de la matrice ϵ indique

donc la production totale d'énergie de chaque secteur énergétique i nécessaire pour fournir une unité monétaire de bien j (ou secteur j) à la demande finale. Le contenu énergétique de chaque secteur j , e_j , est donc la somme de toutes les contributions de chaque secteur énergétique au secteur j , par unité monétaire de vente de bien j à la demande finale :

$$e_j = \sum_i \epsilon_{ij} \quad j = 1, n \quad \text{et} \quad i = \text{secteur énergétique}$$

Cette procédure ne tient pas compte de l'énergie contenue dans les biens importés, qui augmente ce contenu énergétique. Une procédure par itérations, considérant la provenance des importations et la manière dont elles sont distribuées dans les secteurs économiques permet d'estimer le contenu énergétique réel des secteurs comprenant l'énergie importée dans les biens (Réf. 8).

Si l'on considère maintenant que le dernier stade du processus économique est la formation de capital physique, il faut alors que la consommation dépende des investissements. Ceux-ci permettent le développement du système économique. Pour leur réalisation, ils nécessitent une production industrielle supplémentaire qui engendre à son tour une augmentation de la consommation à travers les revenus versés. Il en résulte que les investissements induisent une consommation et une production supérieure au niveau antérieur, de biens, de services et d'énergie.

En particulier, les investissements énergétiques N conduisent à une consommation supplémentaire d'énergie (Réf. 9) :

$$E = R \cdot (I - A - CW)^{-1} \cdot N$$

où C est la matrice de propension à consommer des consommateurs (ménages et consommation publique) et W la matrice de distribution par secteur des revenus. La consommation des ménages et des administrations publiques peut ainsi être rendue endogène. En plus de l'énergie contenue dans les biens nécessaires à un investissement, l'énergie qui sera plus tard achetée, directement ou indirectement par les consommateurs est comptée.

4.3. Le contenu énergétique des biens et services, en Suisse (1970)

La méthode de calcul décrite ci-dessus pose quelques problèmes d'application pour la Suisse. Il n'existe en effet pas de table des échanges inter-industriels suisse pour 1970 ni de véritable table de distribution d'énergie ventilée entre les différents secteurs industriels. Elles ont donc été estimées à partir des données disponibles qui, finalement, permettent d'aboutir à une première et bonne approximation des contenus énergétiques.

- a) Pour pallier au manque de données au niveau suisse, il a été nécessaire d'employer un formalisme. La matrice suisse a été calculée par une méthode "rAs" sur la base de matrices intérieures et des importations des pays des Communautés européennes, telle que :

$$A_{CH} = \hat{r} \cdot A_P \cdot \hat{s}$$

où \hat{r} et \hat{s} sont deux matrices diagonales de paramètres trouvées sur la base des propositions de Stone (Réf. 19) :

$$[(\hat{r} \cdot A_P \cdot \hat{s}) \cdot \hat{X}_{CH}] \cdot i = C_{CH}$$

$$i^T \cdot [(\hat{r} \cdot A_P \cdot \hat{s}) \cdot \hat{X}_{CH}] = D_{CH}^T$$

où CH et P caractérisent vecteurs ou matrices pour la Suisse et un pays extérieur, \hat{X} est la matrice diagonale de la production totale, C le vecteur des consommations intermédiaires, D le vecteur des entrées intermédiaires, i un vecteur unité et T le symbole de transposition. Les coefficients de la matrice A_{CH} sont définis à partir de deux effets combinés (Réf. 20) :

- . un effet de substitution parmi les consommations intermédiaires qui se manifeste en ligne (coefficient de \hat{r})
- . un effet de fabrication qui mesure les changements dans la proportion des apports en valeur ajoutée, qui se manifeste en colonne (coefficients de \hat{s}).

Les données qui ont permis l'estimation des matrices intérieures et des importations de la Suisse proviennent pour les entrées intermédiaires et la production totale de (Réf. 21), pour la demande finale de (Réf. 20) et pour les importations et exportations de (Réf. 22). Les tables Entrées-Sorties des Communautés européennes (Réf. 23) ont dû être agrégées suivant les informations disponibles pour la Suisse par secteur économique et suivant le niveau de ventilation de la table énergétique suisse.

- b) La table suisse de distribution de l'énergie a été construite en termes de pertes d'énergie, ce qui a deux avantages principaux :
- . le double comptage en termes d'énergie qu'implique la transformation des agents énergétiques et leur consommation dans les secteurs industriels est évité, puisqu'on ne comptabilise que les pertes au niveau où elles ont lieu
 - . l'équivalence entre les différentes formes d'énergie est assurée sur la base des pouvoirs calorifiques des combustibles (en particulier, le Wh électrique est compté à 3600 joules à la différence de nombreux bilans énergétiques - OCDE, OSCE).

Tout se passe donc comme si chaque consommateur et chaque utilisateur achetait la possibilité de perdre de l'énergie pour accroître sa production ou son niveau de confort.

Les agents énergétiques considérés sont les mêmes que ceux des Communautés européennes et leur ventilation dans les différentes industries a été effectuée sur la base de (Réf. 24, 25 et 26) principalement.

La figure E12 montre le contenu énergétique des biens et services par unité monétaire de demande finale en MJ/Fr., en 1970 et pour 17 secteurs industriels suisses. Le premier niveau indique le contenu énergétique de la production intérieure, alors que le deuxième prend en compte l'énergie contenue dans les biens importés. Ces contenus ont été calculés par une pondération des matrices suisses sur la base de la provenance des importations. Les matrices ont été obtenues à partir de celles de la République Fédérale allemande, de la France, de l'Italie, de la Belgique, du Royaume-Uni et de l'Europe des Six et diffèrent peu entre elles, quel que soit le pays d'origine. Les contenus énergétiques sont particulièrement élevés dans les secteurs "chimie", "pierre, terre" et transports". L'énergie contenue dans les biens importés augmente, de plus du double en général, le contenu énergétique des biens produits intérieurement. Cela n'est guère surprenant puisque les industries suisses sont plutôt des industries de transformation : les produits semi-finis, achetés à l'étranger, sont à haut contenu énergétique et leur transformation en produits finis ne nécessite que peu d'énergie directe. Ainsi, les produits de base des secteurs "chimie" et "métallurgie", demandant beaucoup d'énergie pour leur fabrication, proviennent d'autres pays, alors que le ciment, plutôt fabriqué en Suisse, accroît sensiblement la consommation d'énergie directe du secteur "pierre, terre". Les secteurs à bas contenu énergétique

sont les secteurs du tertiaire (commerces, banques et services divers - sauf les services de transport bien entendu), ainsi que l'agriculture (les engrais et fertilisants sont comptés au poste "chimie").

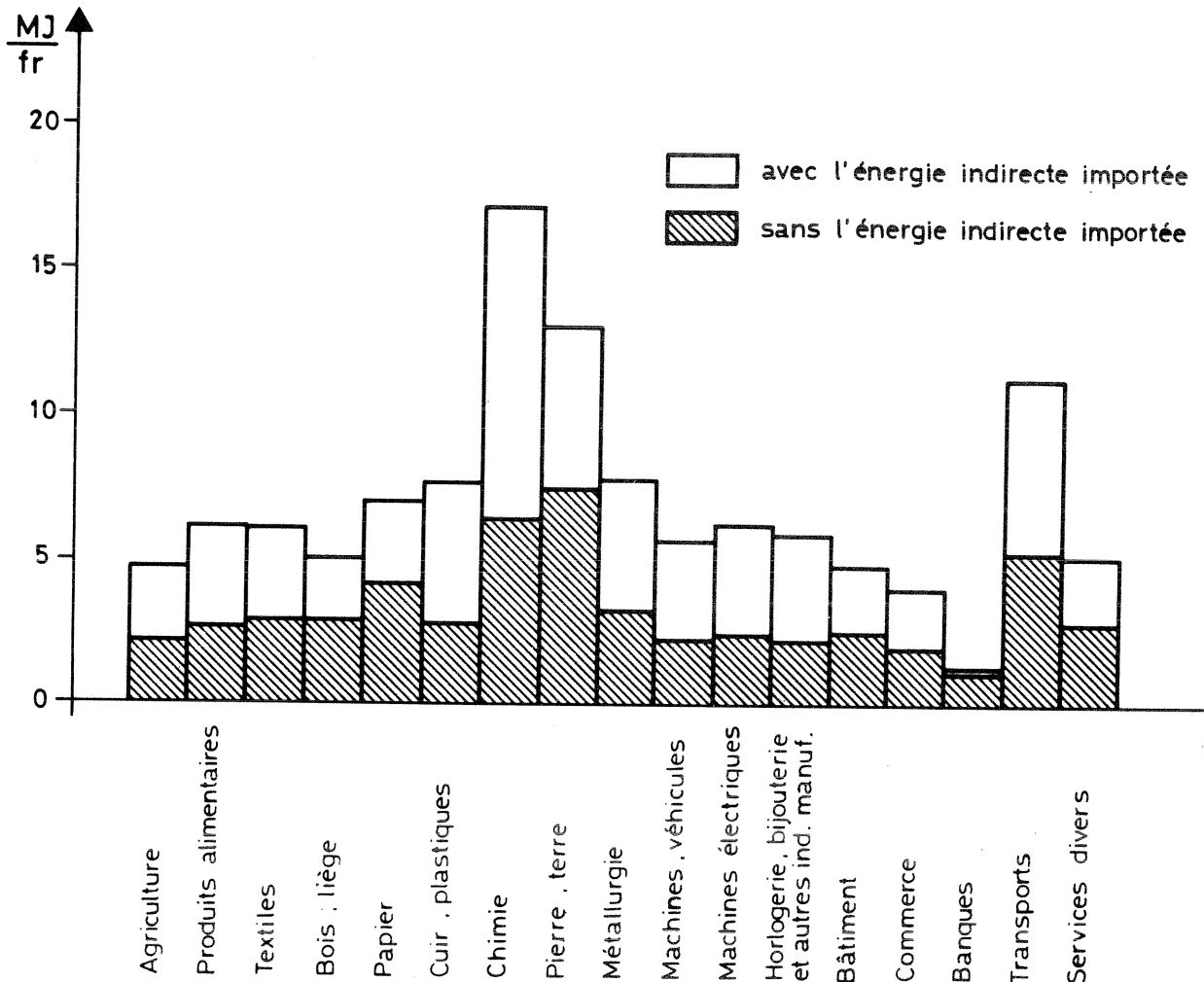


Figure E12 : Contenu énergétique des biens et services par unité monétaire de demande finale en Suisse, en MJ/Fr. (1970).

La consommation d'énergie par unité de PIB en Suisse (7,5 MJ/Fr. en 1970) est faible comparativement aux autres pays industrialisés européens (11,8 MJ/Fr. en Italie à 16,9 MJ/Fr. au Royaume-Uni). Mais en corrigeant ces valeurs par la prise en compte de l'énergie contenue dans les biens importés ainsi que dans les biens exportés, la consommation globale d'énergie augmente en Suisse alors qu'elle baisse au Royaume-Uni et surtout en Belgique (Réf. 8).

En effet, en Suisse et en 1970, l'énergie contenue dans les biens et services importés est estimée à partir des contenus énergétiques ci-dessus

à environ 399 PJ. L'énergie contenue dans les biens exportés est de 232 PJ. La consommation réelle d'énergie est donc de 842 PJ au lieu des 675 PJ donnés généralement (énergie directe), c'est-à-dire une augmentation de 25 %. La balance énergétique du pays est donc largement excédentaire, au contraire de certains pays européens (Royaume-Uni, Belgique).

La connaissance des contenus énergétiques par unité monétaire de demande finale permet donc :

- . la comparaison énergétique des différents secteurs d'activité au niveau national et au niveau international. La structure de la production est un élément important qui détermine la manière dont l'énergie est distribuée tout au long du cycle de production et jusqu'à la demande finale.
- . l'évaluation d'un changement de la structure de la demande finale, c'est-à-dire du PIB, ou d'une augmentation de l'activité générale (croissance du PIB) sur le niveau par exemple des importations d'énergie, comptées en termes d'énergie, comme le pétrole. De même, il est possible d'estimer les effets au niveau de l'emploi, en liaison avec les structures industrielles.
- . l'estimation de la véritable balance énergétique d'un pays, en comptant l'énergie contenue dans les biens importés et exportés. Cela peut être étendu sans difficulté à chaque secteur d'activité économique pour montrer ceux qui sont bénéficiaires en énergie et ceux qui sont déficitaires. Par suite, il est possible de se demander s'il est préférable d'importer, pour un PIB croissant, plus d'énergie ou plus de biens et services.
- . l'établissement d'une base prévisionnelle, en évaluant la demande en énergie des différents secteurs suivant l'estimation de leur croissance économique.
- . la mise en évidence des liaisons énergie-économie au sens général et plus particulièrement vis-à-vis des investissements dans les domaines énergétique et industriel. Les contenus énergétiques sont à multiplier alors d'un facteur 3 à 5 suivant les secteurs, si la demande finale n'est composée que des seuls investissements. En effet, la consommation supplémentaire qu'ils engendrent se trouve répercutée sur le niveau d'activité des industries et la croissance générale de l'économie, augmentant la consommation d'énergie dans le pays. Cela implique une augmentation des importations, qu'elles soient d'énergie ou de biens et services.

4.4. Temps de remboursement énergétique des technologies

Le rendement net R_4 a été défini au §2. Il représente le rapport entre l'énergie fournie par l'aménagement et toutes les énergies reçues par l'aménagement durant toute sa durée de vie. Les limites du système considéré se doivent d'être claires. Faut-il par exemple compter ? :

- . l'énergie que l'on pourrait retirer des matériaux rendus inutiles une fois l'exploitation de l'aménagement terminée
- . l'énergie développée ou consommée par le personnel de l'aménagement (ce qui ferait intervenir l'effet multiplicateur de l'investissement sur l'ensemble de l'économie).

Ces phénomènes doivent être examinés dans la mesure où leur intégration dans le système économique est nécessaire pour avoir une meilleure compréhension des liaisons énergie-économie. Sur le plan technique, toutefois, de premiers ordres de grandeur valables du rendement net R_4 sont dressés dans CARTEN, sur la base des contenus énergétiques par unité monétaire de demande finale (et non d'investissement), qui ne font donc pas intervenir les deux aspects mentionnés ci-dessus.

Il est, de même, possible de définir le temps de remboursement énergétique des technologies. Si l'on se limite à l'investissement seul (sans ce qui est nécessaire pour l'exploitation), il sera défini par le rapport :

$$T_R = \frac{\text{Energie investie} \times \text{facteur de conversion}}{\text{Energie fournie annuellement par la technologie}} \quad [\text{an}]$$

Le facteur de conversion permet de convertir l'énergie investie comptée en énergie primaire sous la forme de l'énergie fournie (par exemple électricité) : un remboursement se juge à la fois sur la quantité et sur la qualité. Ce facteur est donc égal au rendement de l'alternative, c'est-à-dire au rendement qu'offre la technologie la plus performante, pour le même output (par exemple 0.35 pour l'électricité) corrigé par la proportion d'électricité nécessaire à la réalisation de l'aménagement (env. 15% de l'énergie totale en Suisse).

La décomposition par secteur industriel de l'investissement d'un aménagement (§2) permet d'évaluer l'énergie investie grâce à la connaissance des contenus énergétiques. La figure E13 indique l'énergie investie et les temps de remboursement de quelques technologies générant de l'électricité.

On insistera sur le fait que n'est considéré ici que le premier investissement, sans l'exploitation de l'aménagement. Il faut rappeler l'incertitude relative aux coûts des technologies et aux taux d'utilisation, spécialement pour les nouvelles technologies telles que la centrale solaire.

	Puissance MW _e	Capital spécifique Fr/kW _{inst.}	Energie investie TJ	Temps de remb. énerg. ans	Durée de vie technique ans
Centrale hydroé- lectrique à accu- mulation	240	3000	4750	2,9	60
Centrale nucléaire (sans 1ère charge d'uranium)	1000	2400	17850	0,6	30
Centrale solaire alpine	100	3760	3100	4,4	30
Centrale thermique charbon	500	1300	4750	0,5	30

Figure E13 : Temps de remboursement énergétique de quelques technologies
(on ne considère ici que l'investissement)

5. EXEMPLES D'APPLICATION

5.1. Limites du système énergétique étudié

Les limites du système énergétique dans lesquelles s'effectueront les études de scénarios et les études de sensibilité sont les suivantes :

- 1) Limites géographiques : ce sont les frontières de la Suisse. Nous ne prenons pas en compte les technologies d'extraction, de raffinage ou de transport jusqu'en Suisse. Les seules interactions entre le système énergétique suisse et les systèmes étrangers se font au niveau des importations et du prix des agents énergétiques. Les atteintes à l'environnement à l'étranger n'ont aucune influence sur le système énergétique suisse.

2) Limite dans le temps : la limite temporelle choisie se situe à l'horizon 2000 (identique à celle de la GEK). Les vingt ans qui nous séparent de cette date représentent la période minimum qui permet d'envisager l'implantation non marginale de nouvelles technologies. En effet :

- . l'introduction et le remplacement d'unités de transformation ou d'utilisation d'énergie nécessite des durées d'études, de développement, de planification et de construction de l'ordre de 5 à 20 ans.
- . les investissements à réaliser pour le système énergétique de l'an 2000 doivent donc être étalés sur de longues périodes. Cependant, le total des investissements calculés pour l'an 2000 reste une valeur cohérente dans la mesure où le système énergétique suisse devra être remplacé en grande partie d'ici à 2000.

3) Degré de désagrégation du réseau : il dépend de l'objectif recherché.

Par exemple, si la comparaison entre scénarios porte sur la répartition de l'énergie intermédiaire ou de l'énergie primaire, une désagrégation poussée du système d'utilisation de l'énergie n'est pas forcément nécessaire. Par contre, une analyse détaillée des technologies de chauffage implique une décomposition fine du sous-système chauffage, afin d'étudier les substitutions possibles.

Les cas d'application envisagés plus loin ont pour but une comparaison des approvisionnements en énergie primaire de différents scénarios énergétiques et par conséquent le nombre des technologies d'utilisation incluses dans le réseau est relativement limité.

La figure E14 montre le réseau détaillé du système énergétique, la représentation par sous-système apparaissant à la figure E6.

5.2. Rappel des limites du modèle

Rappelons les principales limites du modèle, mentionnées au § 2.5.

- . Pas de rétroactions entre le système énergétique et le système socio-économique.
- . Le modèle est de type statique.
- . Le modèle ne permet pas de traiter le problème de la disponibilité (pointes de consommation, dimensionnement des stocks et réseaux, etc).

Ainsi, les puissances calculées sont des puissances moyennes (puissance installée x taux d'utilisation).

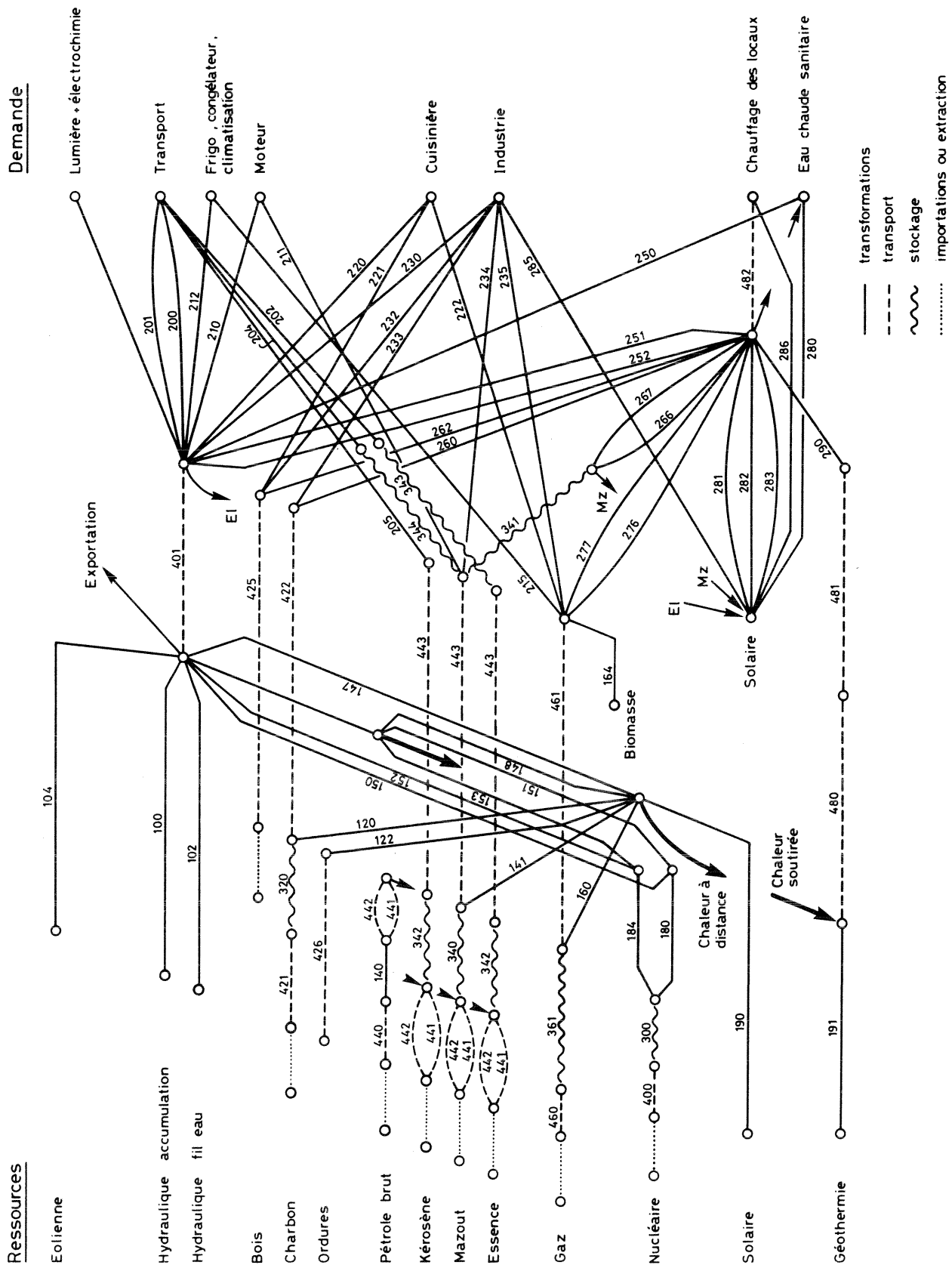


Figure E14 : Réseau détaillé du système énergétique (avec numéros des technologies de CARTEN)

D'autre part, à un niveau plus détaillé, le modèle ne permet de traiter les puissances auxiliaires et les puissances sous-produit que comme fonction constante des puissances fournies totales. Ainsi, les taux de puissance auxiliaire et de puissance sous-produit sont des constantes.

Finalement, il faut signaler que les valeurs de CARTEN ne sont pas toujours fiables, et en particulier les valeurs des coûts.

Les limites et restrictions énumérées ci-dessus nécessitent une mise en garde.

Avertissement

Les cas d'application présentés dans la suite du chapitre doivent être interprétés avec une certaine prudence.

Nous avons voulu montrer les possibilités d'application du modèle, ainsi que les possibilités de présentation, de comparaison et d'interprétation des résultats, mais il ne faut pas accorder trop d'importance aux valeurs numériques présentées dans ces exemples.

5.3. Demande annuelle d'énergie utile, scénarios choisis

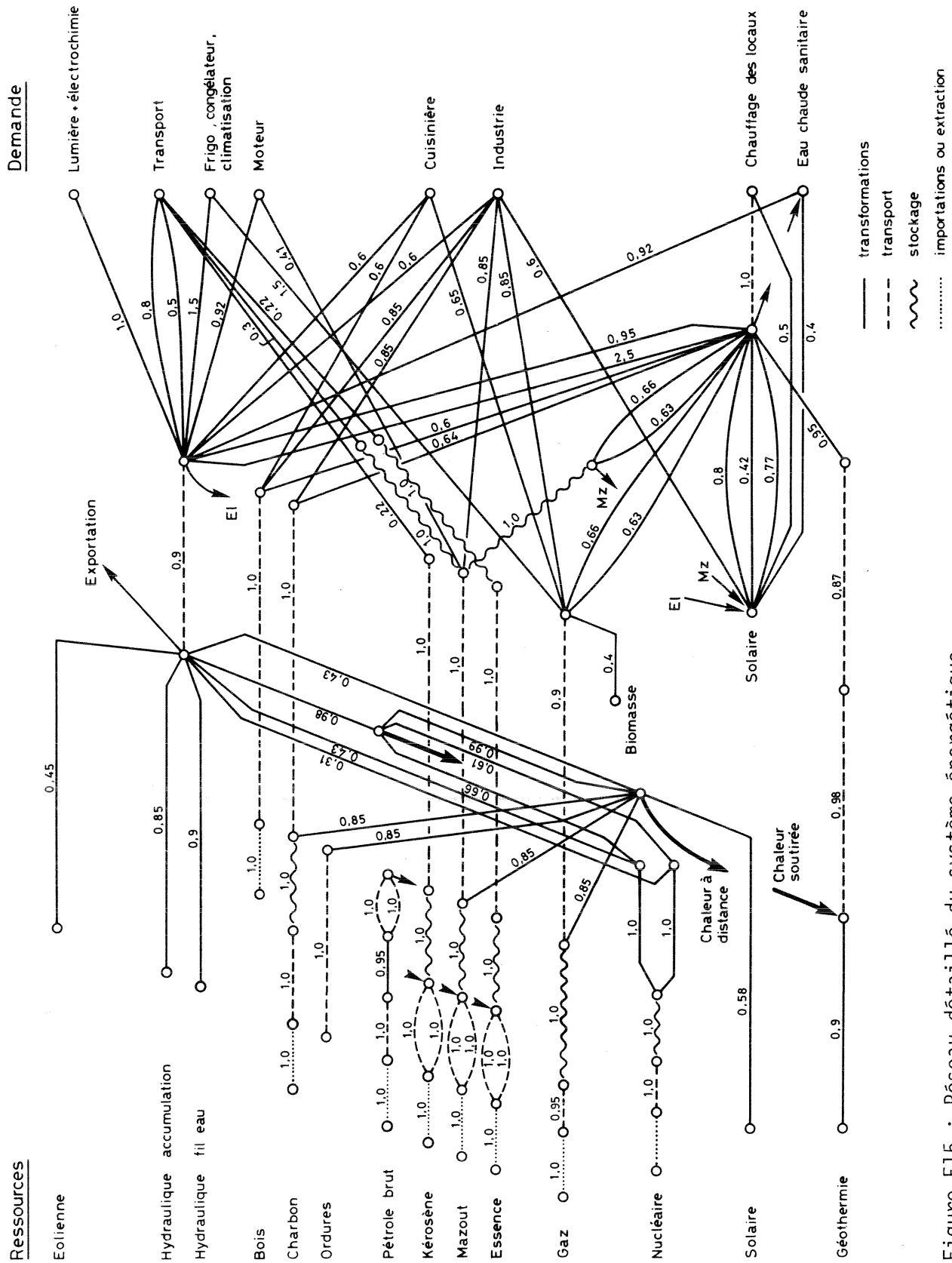
La demande annuelle d'énergie, définie dans le cadre de scénarios, est une des principales données du modèle. Nous ferons appel aux définitions suivantes :

- . scénario de la demande (scénario économique) : évolution possible de la demande à partir d'hypothèses faites sur le système économique (croissance, démographie, taxes sur l'énergie, etc)
- . scénario énergétique : répartition des puissances énergétiques dans l'ensemble des technologies du réseau pour satisfaire une demande donnée
- . stratégie énergétique : ensemble de mesures de politique énergétique en vue de mettre en oeuvre les scénarios choisis, ainsi que leurs incidences sur les plans juridique, financier, écologique et social.

5.3.1. Demande d'énergie utile

Le "Modal-Split" de la GEK indique la répartition des consommations, par agent énergétique et par secteur d'utilisation.

L'énergie utile s'obtient en multipliant les valeurs d'énergie intermédiaire du modal-split par les rendements des technologies d'utilisation. Ces demandes ont été agrégées suivant les catégories de la figure E15.



5.3.2. Scénarios choisis

Le choix de deux scénarios bien différenciés est présenté comme exemple d'application afin d'illustrer les possibilités du modèle. Les bases en sont le scénario IIIc de la GEK et un scénario de stabilisation de la consommation.

Le scénario IIIc part de l'idée qu'un article constitutionnel sur l'énergie sera adopté dans les années 80, que des compétences supplémentaires seront par conséquent accordées à la Confédération et qu'une taxe de 6% sera prélevée sur l'énergie. La demande en énergie utile a les caractéristiques suivantes :

- . globalement, elle augmente d'environ 60% par rapport à 1975
- . la part du chauffage diminue fortement (de 43% du total à 38%)
- . par contre, la part de l'industrie augmente et celle des besoins frigorifiques est triplée (de 2 à 6% du total)
- . tous les autres secteurs restent stables.

Le scénario de stabilisation correspond en majeure partie aux hypothèses du groupe EWU (Réf. 26) et du CECH (Réf. 27). Il s'écarte des scénarios de la GEK dans la mesure où il prévoit d'une part une amélioration des performances des technologies et d'autre part des changements significatifs et à discuter dans la structure de la demande.

La figure E16 montre la structure actuelle de la demande en énergie utile et permet de comparer les deux scénarios choisis. Le scénario de stabilisation se démarque nettement du scénario GEK IIIc en ce qui concerne la demande d'énergie utile pour :

- . les transport (substitution des moyens de transport individuels par les moyens de transport collectifs)
- . la production du froid (limitation du recours à la climatisation)
- . l'eau chaude sanitaire (légère augmentation de la demande par rapport à 1975)
- . le chauffage (maintien de la demande au niveau actuel malgré l'augmentation prévisible du volume total à chauffer).

5.4. Application du modèle et analyse des résultats

Pour ces deux scénarios de la demande (IIIc et stabilisation), le programme RETINE répartit les puissances fournies selon différents critères

	1975		GEK IIIc 2000		Stabil. 2000	
Lumière + électroch. <i>Indice</i>	508 100	(4.6%)	877 174	(5%)	600 120	(4.5%)
Transport	1272 100	(11.5%)	1714 135	(10%)	1500 118	(11%)
Réfrigération, congélation, climatisation	224 100	(2%)	990 442	(6%)	335 149	(2.5%)
Moteur	1078 100	(9.8%)	1742 161	(10%)	1626 150	(12%)
Cuisinière	505 100	(4.6%)	746 148	(4.3%)	400 80	(3%)
Industrie	1608 100	(14.6%)	2797 174	(16%)	2600 162	(19%)
Eau chaude	1106 100	(10%)	1798 162	(10%)	1350 122	(10%)
Chauffage	4718 100	(43%)	6670 141	(38.5%)	5000 106	(37%)
TOTAL	11020 100	(100%)	17324 157	(100%)	13400 122	(100%)

Figure E16 : Demande annuelle d'énergie utile pour différents secteurs et pour deux scénarios 2000, en MW

d'affectation (coût, rendement, rendement net, exergie) et pour plusieurs sévérités.

L'analyse des scénarios peut donc se faire à trois niveaux :

- . comparaison des résultats selon le critère d'affectation
- . comparaison des demandes
- . examen de l'évolution des puissances fournies en fonction des différentes sévérités.

Les résultats peuvent être présentés sous la forme de :

- . schémas du réseau avec les puissances fournies
- . tableaux comparatifs des puissances fournies exprimées en unités physiques (tonnes de combustibles consommées, nombre de centrales, de camions, etc)
- . profils d'énergie primaire annuelle.

Pour ne pas multiplier les cas de figures, un exemple de description est donné dans la suite pour chaque niveau de comparaison.

De plus, la sensibilité du modèle est testée pour un paramètre (le prix du pétrole) et pour l'introduction de contraintes de puissance maximum sur certains agents énergétiques primaires et sur certaines technologies d'utilisation.

5.4.1. Comparaison des puissances selon le critère d'affectation

Ces premiers exemples d'application sont destinés à montrer comment s'effectue le processus d'affectation pour un critère donné, le système étant soumis à un minimum de contraintes. Certaines contraintes de puissance maximum ont été mises sur les ressources d'énergie primaire. Par contre, les technologies ne sont soumises à aucune contrainte de puissance minimum (en particulier, l'hydraulique).

Les figures E17 à E20 montrent le réseau de la figure E6 avec les puissances fournies par les technologies pour une même sévérité (sévérité 1) et quatre critères d'affectation :

- . rendement énergétique (R_2)
- . rendement exergétique (R_3)
- . rendement net (R_4)
- . coût d'exploitation spécifique (Cex).

L'attractivité est définie par $\alpha = \frac{\eta}{1-\eta}$ pour les différents rendements et par $\alpha = \frac{1}{C}$ pour le coût (voir § 3.4.).

Les rendements énergétiques R_2 de toutes les technologies du réseau sont montrés à la figure E15.

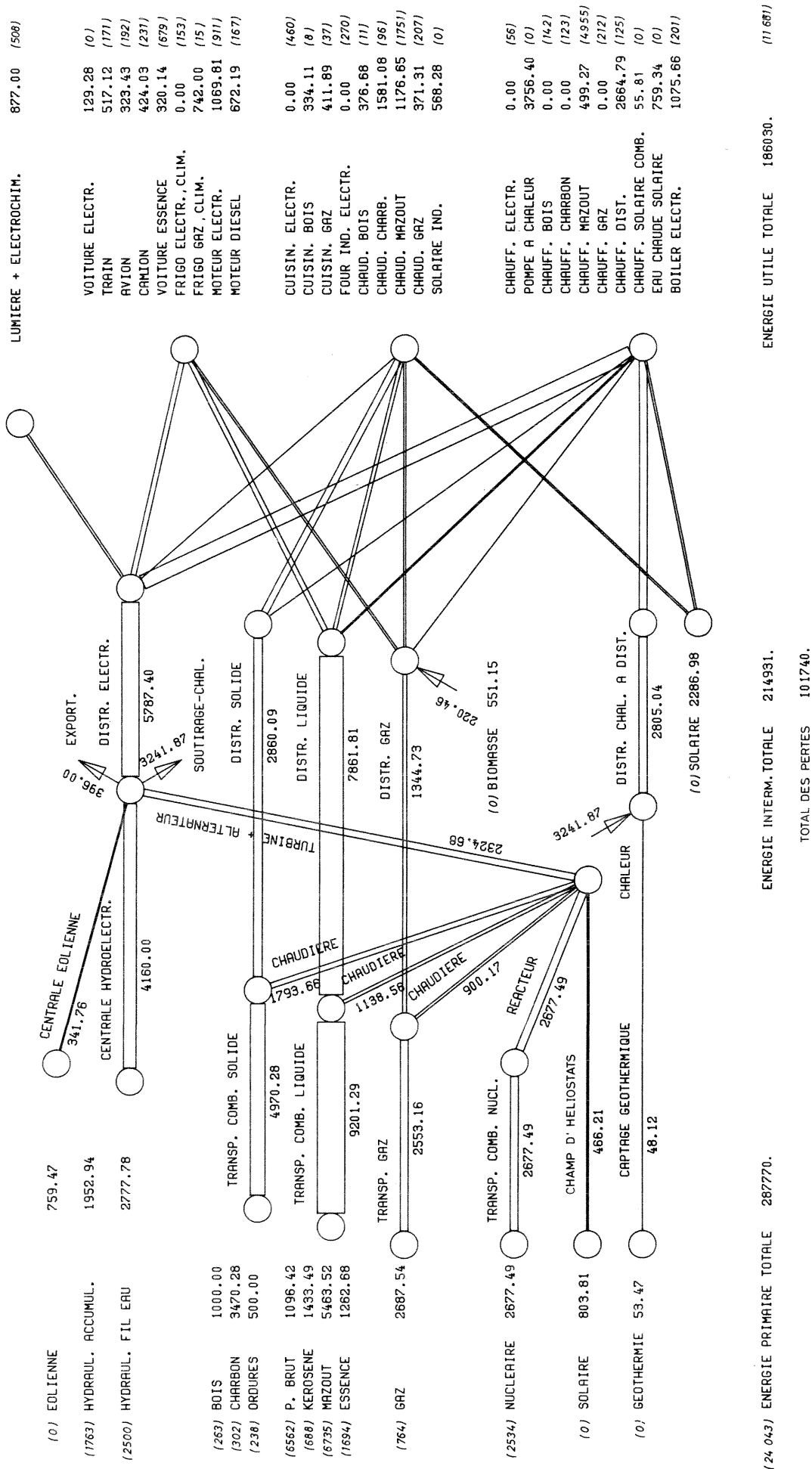
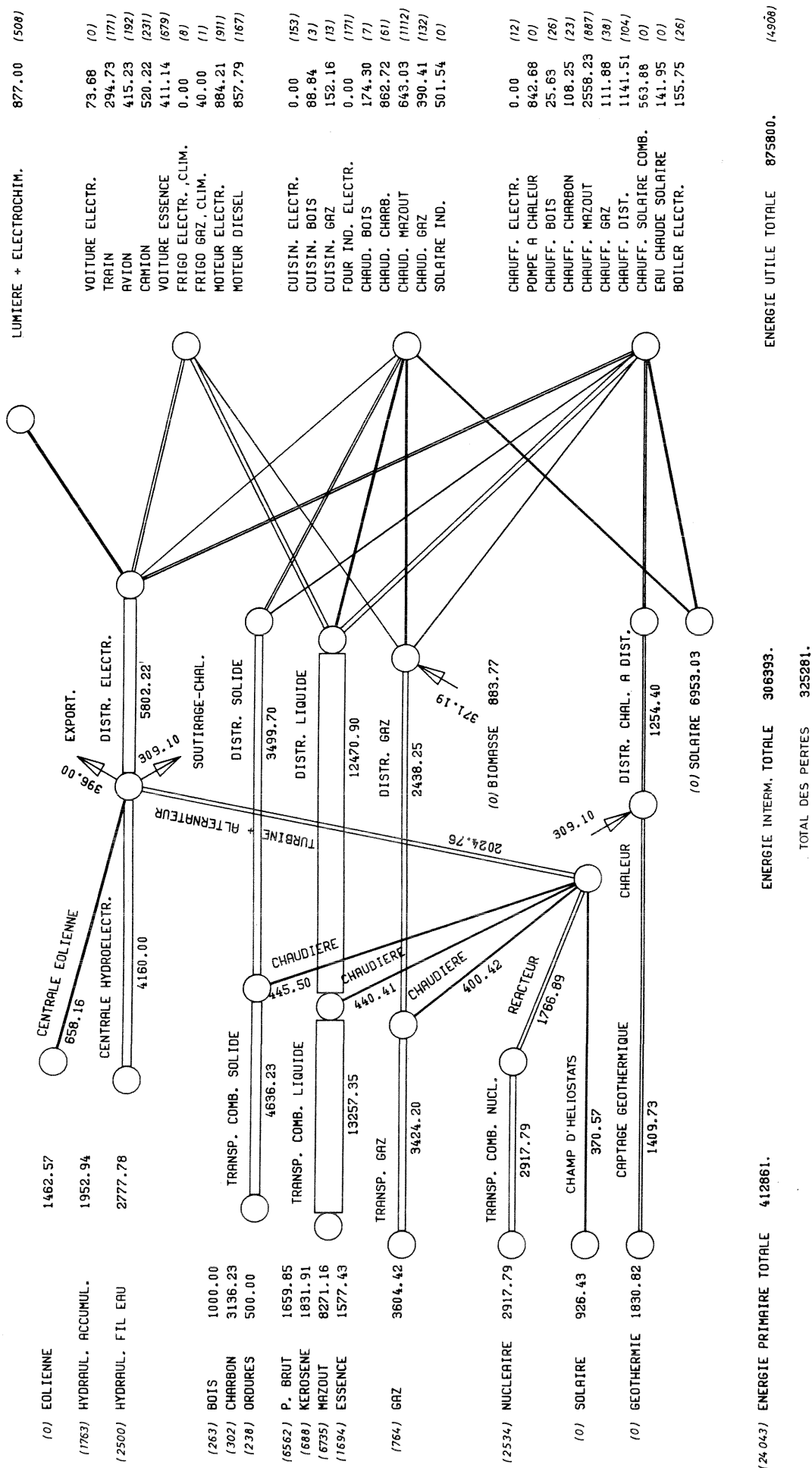


Figure E17 : Flux d'énergie (MW) dans le système énergétique (affectation en rendement R_2 , sévérité 1, année 2000, variante III_c)



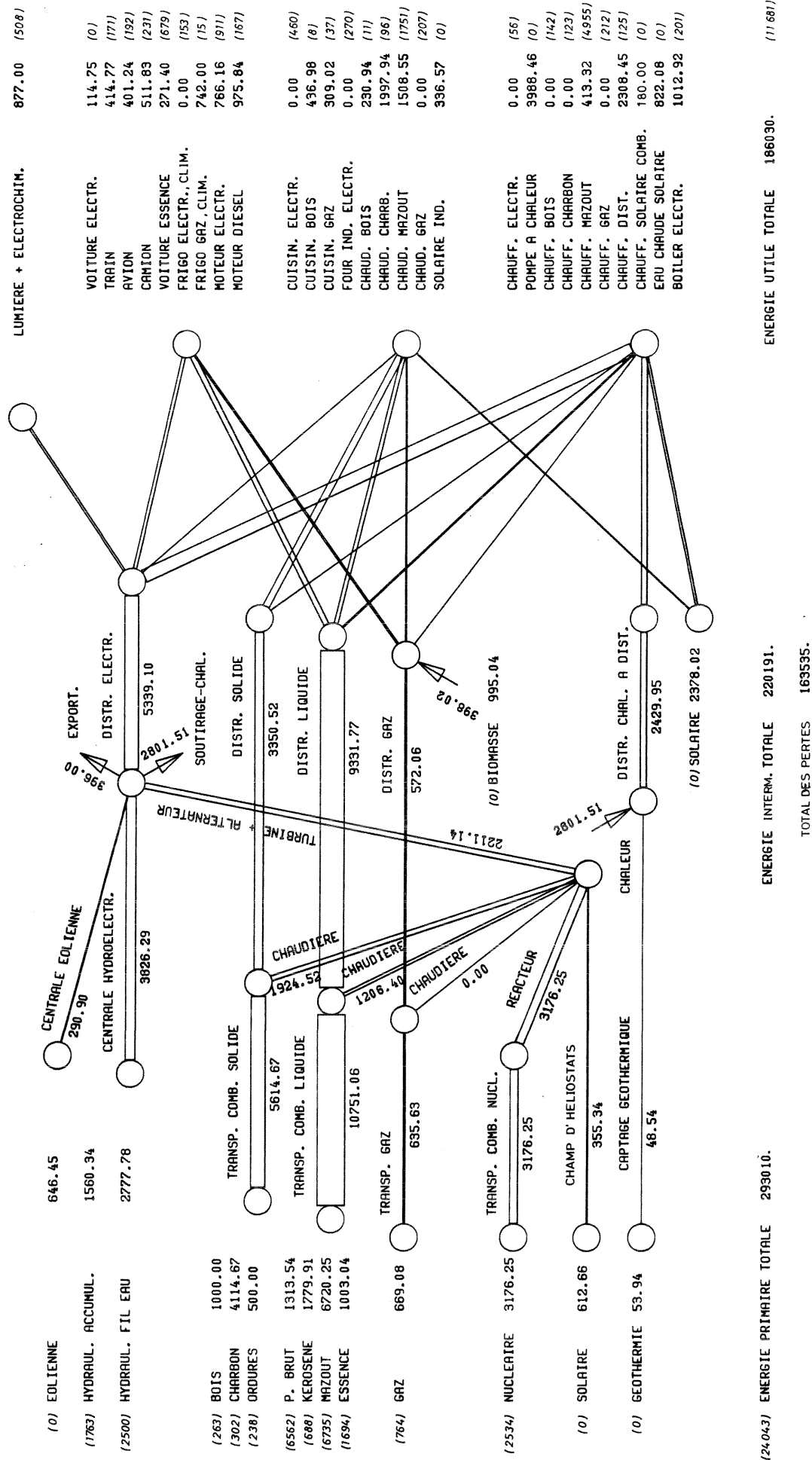


Figure E19 : Flux d'énergie (MW) dans le système énergétique (affectation en rendement R_4 , sévérité 1, année 2000, variante IIIc)

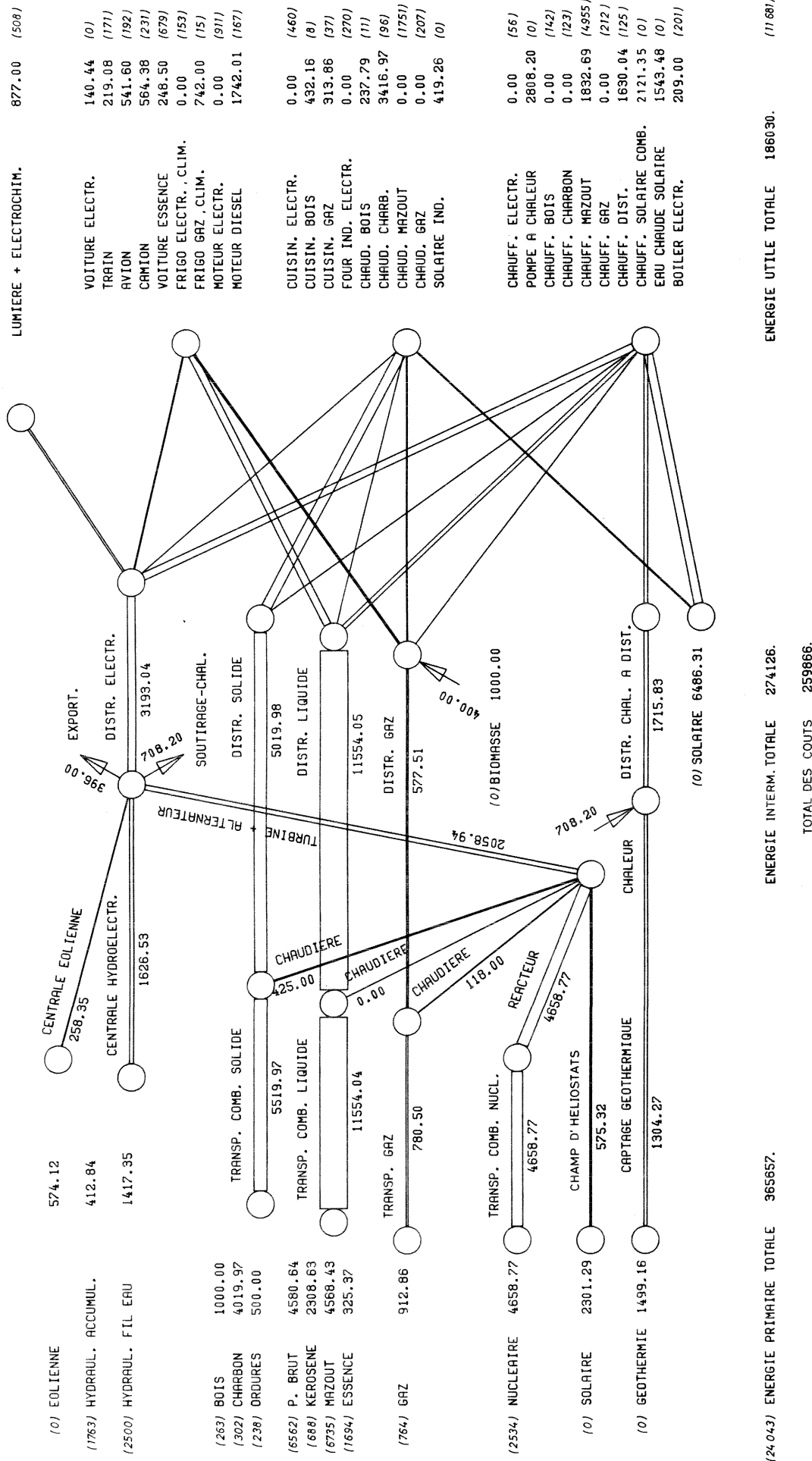


Figure E20 : Flux d'énergie (MW) dans le système énergétique (affectation en coûts, sévérité 1, année 2000, variante IIIc)

Les contraintes de puissances maxima pour quatre ressources sont :

- . hydro-électricité : 4160 $\overline{\text{MW}}$
- . bois : 1000 $\overline{\text{MW}}$
- . ordures : 500 $\overline{\text{MW}}$
- . biogaz : 1000 $\overline{\text{MW}}$

Les estimations récentes pour l'hydro-électricité (Réf. 28) situent la limite d'implantation maximale en l'an 2000 à 15% en dessus du niveau actuel. Le potentiel de 500 $\overline{\text{MW}}$ d'ordures correspond à 1 kg d'ordures (\approx 2000 kcal/kg) produites par personne et par jour. Les contraintes de puissances maxima pour le bois et le biogaz sont liées aux ressources disponibles (Réf. 29 , 30).

La comparaison des quatre figures fait ressortir les points suivants :

- . Hydro-électricité : La bonne attractivité des chaînes allant des ressources hydrauliques aux technologies utilisant l'électricité est due aux rendements R_2 et R_3 élevés, ce qui explique pourquoi on "colle" aux contraintes. Par contre, avec le coût d'exploitation spécifique comme critère d'affectation, les chaînes hydro-électriques sont nettement moins attractives et le handicap du capital spécifique (3000 Fr/ $\overline{\text{kW}}$ pour la centrale à accumulation) se reporte dans une moindre mesure sur le rendement net R_4 . Le coût d'exploitation admis est cependant trop élevé car nous avons supposé que les installations existantes n'étaient pas encore amorties.
- . Combustibles fossiles : On note la relativement faible influence du critère d'affectation sur la demande totale en combustibles fossiles. Il y a toutefois des différences dans la répartition entre charbon, pétrole et gaz. Par exemple, l'augmentation de la demande en mazout pour l'affectation en exergie s'explique par l'attractivité des technologies solaires combinées utilisant le mazout comme appoint. La diminution très nette de la demande de gaz pour le critère coût ou rendement R_4 est due aux investissements élevés que nécessite un réseau de distribution de gaz (canalisations, gazomètres).
- . Nucléaire : Les performances médiocres des centrales nucléaires expliquent pourquoi l'attractivité des chaînes énergétiques partant de la fission de l'uranium reste assez faible comparativement aux autres chaînes énergétiques. Pour les rendements R_2 , R_3 et R_4 utilisés comme critères d'affectation, la demande primaire se situe aux alentours de 3000 $\overline{\text{MW}}$, niveau de peu supérieur à la consommation en 74 (2340 $\overline{\text{MW}}$). La situation est cependant plus favorable au nucléaire pour le critère coût puisque l'on monte

à environ 4650 $\overline{\text{MW}}$ de demande primaire. Cela tient à la faible part du prix du combustible dans le coût d'exploitation spécifique (pour une sévérité plus élevée en coût, la part de nucléaire augmente nettement (§ 5.4.3.)).

- . Energies "nouvelles" : La comparaison entre rendement énergétique R_2 et rendement énergétique R_3 montre que le second critère favorise davantage l'énergie solaire, l'énergie éolienne et la géothermie que le premier critère. C'est particulièrement visible pour la géothermie basse énergie qui supplante les autres sources d'énergie pour le chauffage à distance. L'énergie géothermique, captée à un niveau de température d'environ 100°C, est évidemment très favorable pour le chauffage des locaux du point de vue exergétique (la chute de température est faible).

5.4.2. Comparaison des puissances résultant des deux scénarios de la demande (IIIc et stabilisation)

A titre d'exemple, les affectations résultant des deux scénarios de demande d'énergie utile décrits au § 5.3. sont comparés entre eux et avec le scénario énergétique prévu par la GEK. L'attractivité est définie par $\alpha = \frac{\eta}{1-\eta}$ avec $\eta = R_2$, la sévérité choisie étant la sévérité 1.

Les puissances ont été calculées en tenant compte des contraintes physiques (quantités maxima possibles) qui s'appliquent sur les ordures, le bois, l'hydraulique et le biogaz.

Les résultats consistent en la comparaison des approvisionnements en énergie primaire des différents scénarios, comme le montre la figure E21.

A noter que l'énergie primaire indiquée à la figure E21 pour les énergies nouvelles comprend les énergies reçues par les capteurs des centrales alpines, les capteurs décentralisés et par les éoliennes ; elle comprend également l'énergie géothermique captée et la biomasse.

Le traitillé horizontal indique l'énergie fournie par ces mêmes technologies.

Cette remarque est également valable pour les figures suivantes.

La comparaison du scénario énergétique GEK 2000 IIIc avec le scénario 2000 IIIc de RETINE montre que :

- . l'énergie primaire totale résultant de l'affectation RETINE est d'environ 25 % inférieure à l'énergie primaire totale prévue par la GEK (environ 30 % inférieure si l'on considère l'énergie fournie par les technologies utilisant des énergies renouvelables - traitillé de la figure E21)

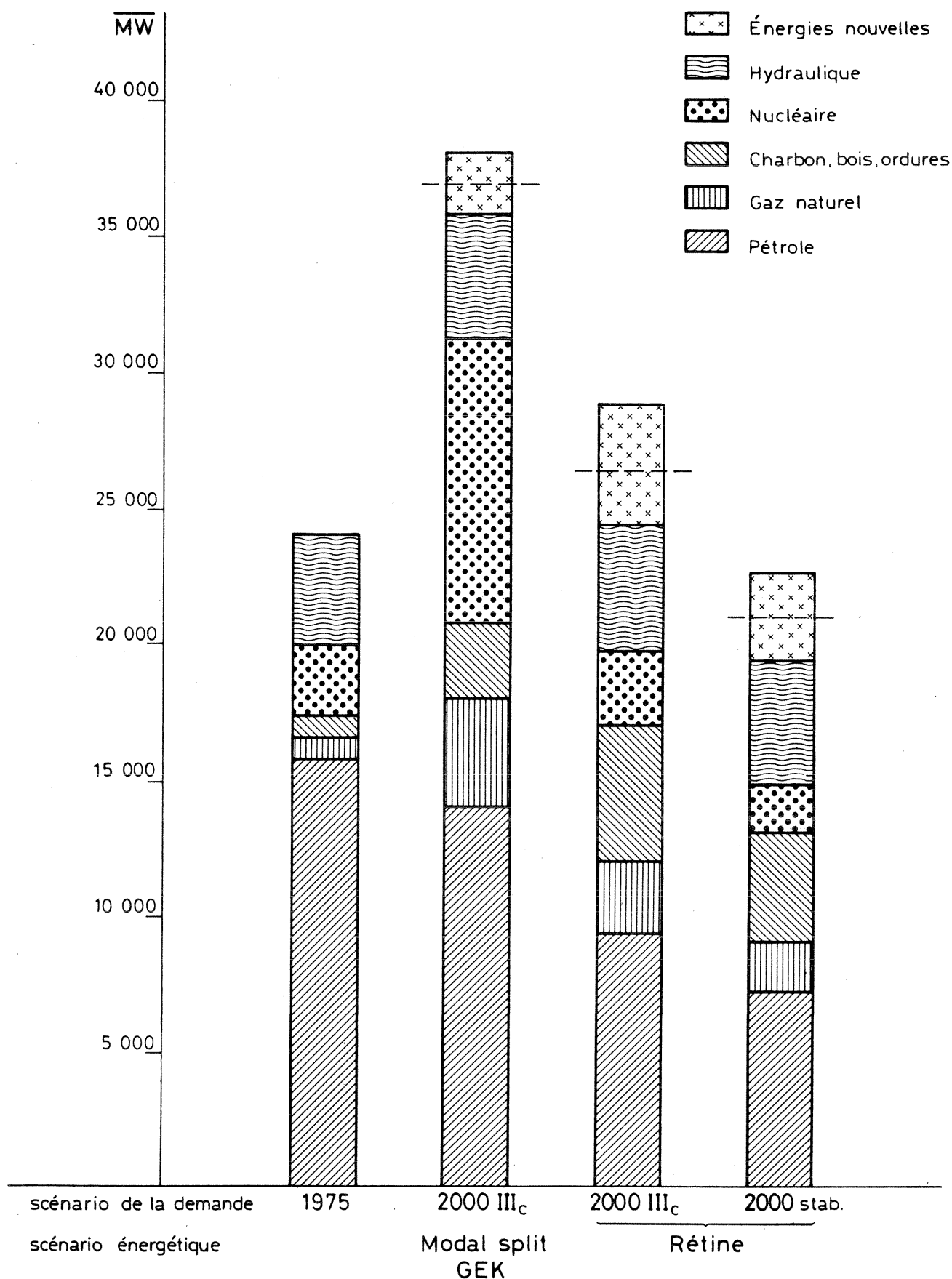


Figure E21 : Exemple de comparaison des approvisionnements en énergie primaire pour différents scénarios de la demande*. (Affectation en rendement R_2 , sévérité 1; contraintes sur les ordures, le bois, l'hydraulique et le biogaz).

* (voir avertissement au §5.2 et commentaires au § 5.4.2)

- . la part du nucléaire est de plus de 70% inférieure dans le cas de l'affectation RETINE ; le nucléaire est substitué en partie par le bois, le charbon et les ordures et en partie par les énergies nouvelles (éoliennes, centrales solaires, solaire décentralisé)
- . les parts du pétrole et du gaz diminuent sensiblement, d'environ 35% pour les deux agents énergétiques.

La comparaison des scénarios énergétiques entre eux pour les scénarios de la demande IIIc et III STAB montre que :

- . les parts des différents agents énergétiques restent à peu près constantes.

Cela s'explique par le fait que la structure de la demande est sensiblement la même dans les deux scénarios. On remarque tout de même certaines différences :

- . l'attractivité de l'hydraulique est telle qu'on atteint la limite d'implantation maximum dans les deux cas. La part de nucléaire est donc amoindrie dans le scénario de stabilisation
- . de même la part du bois et des ordures augmentent légèrement dans ce scénario, puisque les contraintes sont également atteintes
- . la part du gaz est nettement plus faible pour le scénario de stabilisation. Ceci est dû à la structure de la demande, en particulier au fait que la climatisation et la réfrigération, assurées par le gaz (pour une affectation en rendement), ont été limitées.

5.4.3. Examen de l'évolution des puissances, coûts d'exploitation annuels et investissements avec la sévérité de l'affectation

L'étude comparée des résultats d'affectations selon différentes sévérités montre l'évolution de la répartition des puissances lorsque la solution tend vers l'optimum du critère considéré. Le cas choisi est l'affectation en coût, l'attractivité étant définie par $\alpha = 1/C$.

L'optimum correspond au minimum du coût d'exploitation annuel, ou ce qui revient au même, au minimum du coût de revient de l'énergie utile. Les coûts pris en considération sont ceux de 1975.

Le scénario de la demande est le scénario IIIc de la GEK.

La comparaison des approvisionnements en énergie primaire du scénario énergétique de la GEK et du scénario RETINE (pour l'affectation en coût, sévérité 1) (figure E22), montre que :

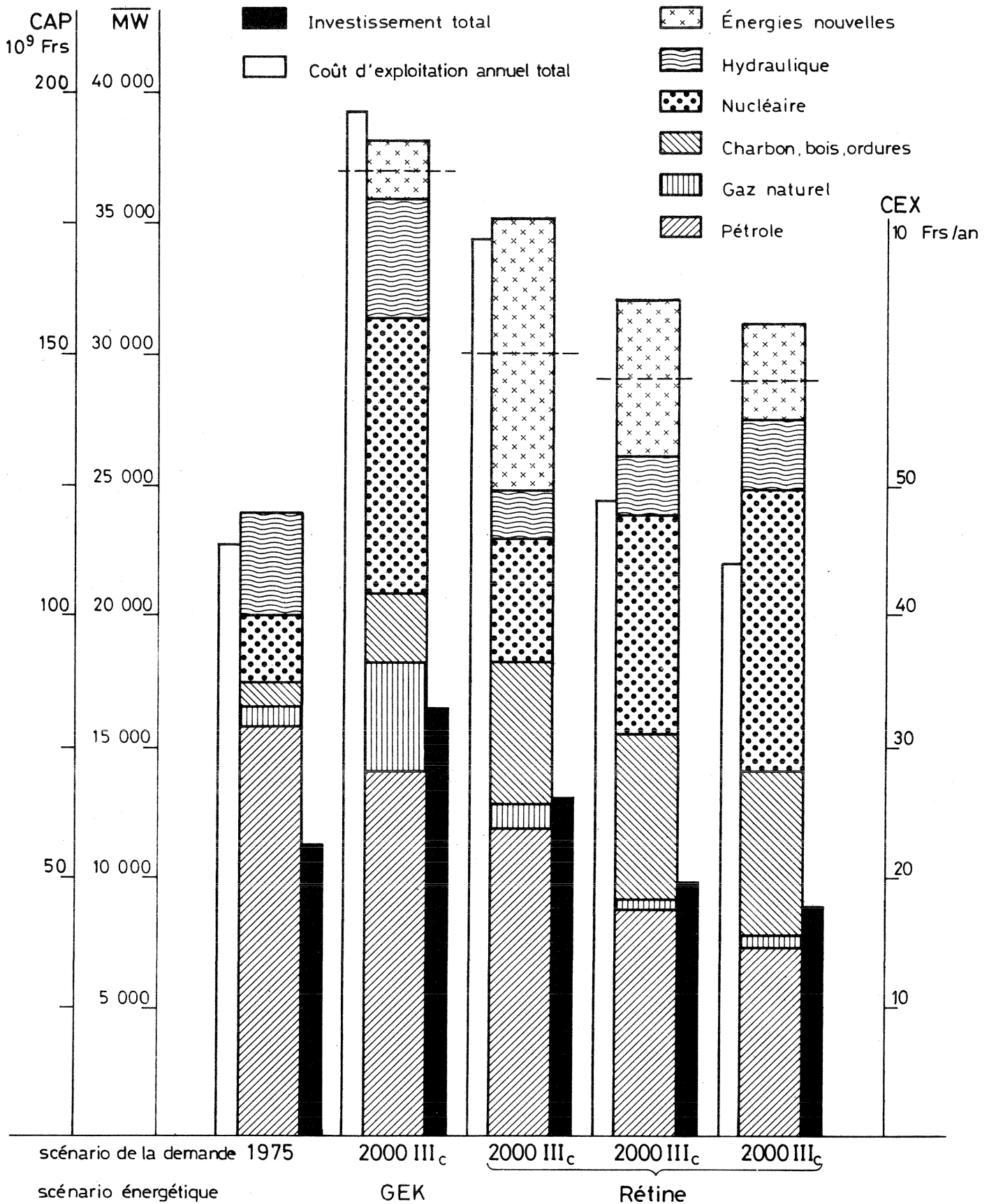


Figure E22 : Exemple de comparaison des approvisionnements en énergie primaire, du coût d'exploitation annuel et des investissements pour différentes sévérités d'affectation*. (Affectation en coût, sévérités 1, 3 et 5; contraintes sur les ordures, le bois, l'hydraulique et le biogaz)

*(voir avertissement au § 5.2 et commentaires au § 5.4.3)

- . l'énergie primaire totale est plus petite dans le cas de l'affectation RETINE (env. 10% inférieure)
- . la part du nucléaire est inférieure de 55 % dans le cas de l'affectation RETINE
- . la part de l'hydraulique diminue également, de plus de 60% (aucune contrainte d'implantation minimale n'a été mise sur l'hydraulique) ; cette importante diminution de l'hydraulique, dont le rendement est relativement élevé, explique pourquoi l'énergie primaire totale est aussi élevée, comparée à celle de l'affectation RETINE en rendement (cf. figure E21). Les coûts d'exploitation relativement élevés de l'hydraulique sont la cause de cette diminution (nous avons admis par simplification que les installations existantes n'étaient pas encore amorties, ce qui n'est pas toujours vrai)
- . le nucléaire et l'hydraulique sont substitués essentiellement (pour la sévérité 1) par les énergies nouvelles, dont la part dans l'approvisionnement passe de 5 % à 30 % environ ; parmi les énergies nouvelles, le solaire décentralisé prend une part prépondérante dans l'approvisionnement, de même que la géothermie et la biomasse.

La part relativement élevée du solaire décentralisé (malgré des coûts d'exploitation élevés) s'explique pour deux raisons. D'une part les chaînes énergétiques les plus courtes sont favorisées ; d'autre part, pour les technologies combinées, seul le coût de la puissance principale reçue est comptabilisé pour la sévérité 1.

Par exemple, pour la technologie de chauffage combiné solaire passif-mazout, le coût de la chaîne du mazout n'est pas comptabilisé, dans la technologie en question, lors de la sévérité 1. Ceci explique pourquoi les technologies solaires décentralisées ont leur part qui diminue avec la sévérité.

La comparaison des approvisionnements en énergie primaire des scénarios générés selon différentes sévérités d'affectation montre les tendances suivantes :

- . l'énergie primaire totale diminue avec la sévérité ; cependant, si l'on considère l'énergie fournie par les technologies solaires (et non pas l'énergie reçue) - traitillé de la figure E22 -, l'énergie primaire reste à peu près constante
- . la part du pétrole diminue sensiblement
- . le gaz disparaît presque totalement à cause du coût relativement élevé de la distribution du gaz

- . les combustibles solides voient leur part augmenter légèrement. Cette augmentation concerne le charbon seulement, car dès la première itération, les limites d'implantation (contraintes) pour les ordures et le bois sont atteintes. Sans ces limites, la part des combustibles solides serait de loin la plus importante (les ordures sont gratuites en tant que combustibles)
- . le quota du nucléaire augmente considérablement (de 2 à 5 centrales de 1000 MWe) du fait d'une part que le combustible est relativement bon marché, et d'autre part que le nucléaire se prête bien à la production combinée de chaleur-force
- . les énergies nouvelles se révèlent relativement peu compétitives du fait de leur prix relativement élevé : leur part diminue avec l'augmentation de la sévérité en coût. Cependant, si le prix du pétrole double, elles deviennent plus attractives (§ 5.4.4.). On rappelle ici que les installations hydroélectriques existantes n'ont pas été considérées comme amorties. Leur faible part provient de leur coût élevé (à comparer avec la figure E21, où l'attractivité est le rendement, conduisant bien-sûr à une part beaucoup plus forte de l'hydraulique).

Il est intéressant de comparer pour ces mêmes scénarios les coûts d'exploitation annuels (ou coût de revient de l'énergie utile) et les investissements globaux (figure E22).

Les différences de coûts et investissements pour le scénario énergétique de la GEK et le scénario RETINE (sévérité 1) s'expliquent au vu de la répartition des puissances dans les technologies.

- En effet, si l'on ne considère que les coûts des agents énergétiques primaires et les coûts et investissements des technologies de transformation d'énergie primaire, le scénario de la GEK est plus favorable que le scénario généré. Malgré un moindre recours à l'énergie hydraulique dans le scénario RETINE, entraînant une diminution des coûts et investissement, le recours aux énergies renouvelables en lieu et place du nucléaire conduit à un surplus important des coûts et investissements.
- Par contre, les coûts et investissements des technologies de transport et de distribution d'énergie intermédiaire ainsi que ceux des technologies d'utilisation (transformation d'énergie intermédiaire) sont inférieurs dans le scénario RETINE ; en particulier, les coûts et investissements pour la distribution du gaz et de l'électricité sont plus faibles. Les

technologies d'utilisation n'étant soumises à aucune contrainte, il en résulte une répartition différente des puissances entre moyens de transport (voiture électrique, train, voiture à essence, avion, etc), cette répartition se faisant en faveur du scénario RETINE (coûts et investissements plus petits).

- Finalement, le coût d'exploitation annuel résultant du scénario RETINE est de 21 % inférieur à celui résultant du scénario de la GEK, et les investissements globaux de 13 % inférieurs.

L'étude de l'évolution des coûts et investissements avec la sévérité de l'affectation indique une diminution. Celle-ci est grande entre les sévérités 1 et 3 (de l'ordre de 25-30 %), mais s'atténue entre les sévérités 3 et 5 (env. 10 %).

Cette diminution des coûts et investissements avec la sévérité s'explique par :

- . la diminution avec la sévérité des combustibles liquides et surtout des énergies nouvelles, de coûts et investissements élevés
- . leur substitution par le nucléaire, de plus faibles coûts et investissements par rapport aux énergies nouvelles ; le coût relativement peu élevé du combustible nucléaire par rapport aux combustibles liquides explique la diminution des coûts lors de la substitution des combustibles liquides par le combustible nucléaire (malgré des frais fixes annuels plus élevés pour le nucléaire)
- . le niveau à peu près constant pour la distribution du gaz et de l'électricité
- . la substitution de la voiture (électrique ou à essence) et de l'avion par le train.

Ainsi, par rapport au scénario énergétique de la GEK, le scénario RETINE généré pour une sévérité d'affectation 5 conduit à des coûts et investissements plus faibles, aussi bien pour les agents énergétiques primaires et les technologies de transformation de l'énergie primaire que pour les technologies d'utilisation ; cela n'était pas vrai pour la sévérité 1.

Une autre manière intéressante de comparer les résultats consiste à convertir les puissances en unités physiques, par exemple en tonnes de combustibles, en m² de capteurs solaires ou en nombre de centrales, ainsi que le montre la figure E23.

	Unités (tonnes, centrales ou m ²)	1975	2000 IIIc Rétine		
			Sévérité 1	Sévérité 3	Sévérité 5
Nucléaire	1000 MWe	1	2	4	5
Hydraulique	150 MWe	61	26	27	31
Solaire décentralisé	m ²	0	59 x 10 ⁷	3 x 10 ⁷	17 x 10 ⁷
Solaire centralisé	100 MWe	0	30	5	1
Eolienne	5 kWe	0	103'350	6'400	0
Géothermie	5 MWe	0	435	465	243
Biogaz	10 kW	0	40'000	40'000	40'000
Charbon	10 ⁶ t	0,35	4,6	5,4	5,5
Pétrole	10 ⁶ t	11,9	8,9	6,7	5,5
Gaz	10 ⁶ m ³	637	761	345	344
Bois	10 ⁶ t	0,6	2,3	2,3	2,3
Ordures	10 ⁶ t	0,9	1,9	1,9	1,9

Figure E23 : Comparaison en unités physiques de trois degrés de sévérité pour l'affectation en coût (scénario de la demande GEK IIIc).

5.4.4. Exemple d'étude de sensibilité

Le prix des agents énergétiques primaires est soumis à d'importantes fluctuations et leur valeur relative variera considérablement d'ici l'an 2000. Il est donc nécessaire de connaître la sensibilité du système à ce paramètre.

Dans l'exemple qui suit, pour le scénario de la demande GEK IIIc, la première étape a consisté à déterminer le système énergétique avec les prix des agents énergétiques 1975. Dans la seconde étape, le prix du pétrole a été doublé, toutes choses égales par ailleurs. L'étude de ces résultats pour les sévérités 1 et 5 apporte d'intéressants renseignements.

La comparaison entre eux des scénarios générés par RETINE selon une sévérité 1 (figure E24) montre que l'élasticité-prix vaut ici $-0.12^{(*)}$, ce qui indique que dans la structure du modèle, le pétrole est relativement bon marché puisqu'un doublement de son prix n'a pas d'effets spectaculaires sur la consommation de produits pétroliers.

Dans le cas examiné, la substitution se fait essentiellement par les énergies nouvelles et par le nucléaire. L'hydraulique participe aussi à cette substitution, mais dans une moindre mesure.

La comparaison pour la sévérité 5 indique cette fois une élasticité de -0.58 . L'élasticité augmente par conséquent avec la sévérité, le modèle étant d'autant plus sensible à une variation de prix que la sévérité est grande.

Pour un doublement du prix du pétrole et une sévérité d'affectation 5, la part du pétrole dans l'approvisionnement en énergie primaire n'est plus que de 10 %. Dans ce cas, la substitution se fait essentiellement par le nucléaire.

5.4.5. Effet de contraintes

Il est intéressant d'examiner comment s'effectue le processus d'affectation sans limite d'implantation sur les technologies, afin de dégager les tendances du système pour un critère donné.

Avec le critère d'affectation R_2 et pour la sévérité 1, la demande en bois dépasse $2,5 \overline{GW}$ et la demande en ordures atteint $2 \overline{GW}$. Ces deux valeurs sont largement supérieures aux possibilités de la Suisse. Il est par conséquent indispensable d'introduire des contraintes sur certaines ressources (voir 5.4.1.) pour éviter des résultats absurdes.

D'autre part, au niveau des technologies, il faut prendre en considération les taux d'implantation actuels et les possibilités de substitution d'ici l'an 2000, afin d'écarter les valeurs peu crédibles.

Les contraintes sur les technologies sont décrites par des courbes d'implantation indiquant la capacité maximum possible en fonction du temps, compte tenu de l'inertie des marchés et du système de production.

(*) c'est-à-dire qu'à une augmentation de 100 % du prix correspond une diminution de 12 % de la demande en pétrole.

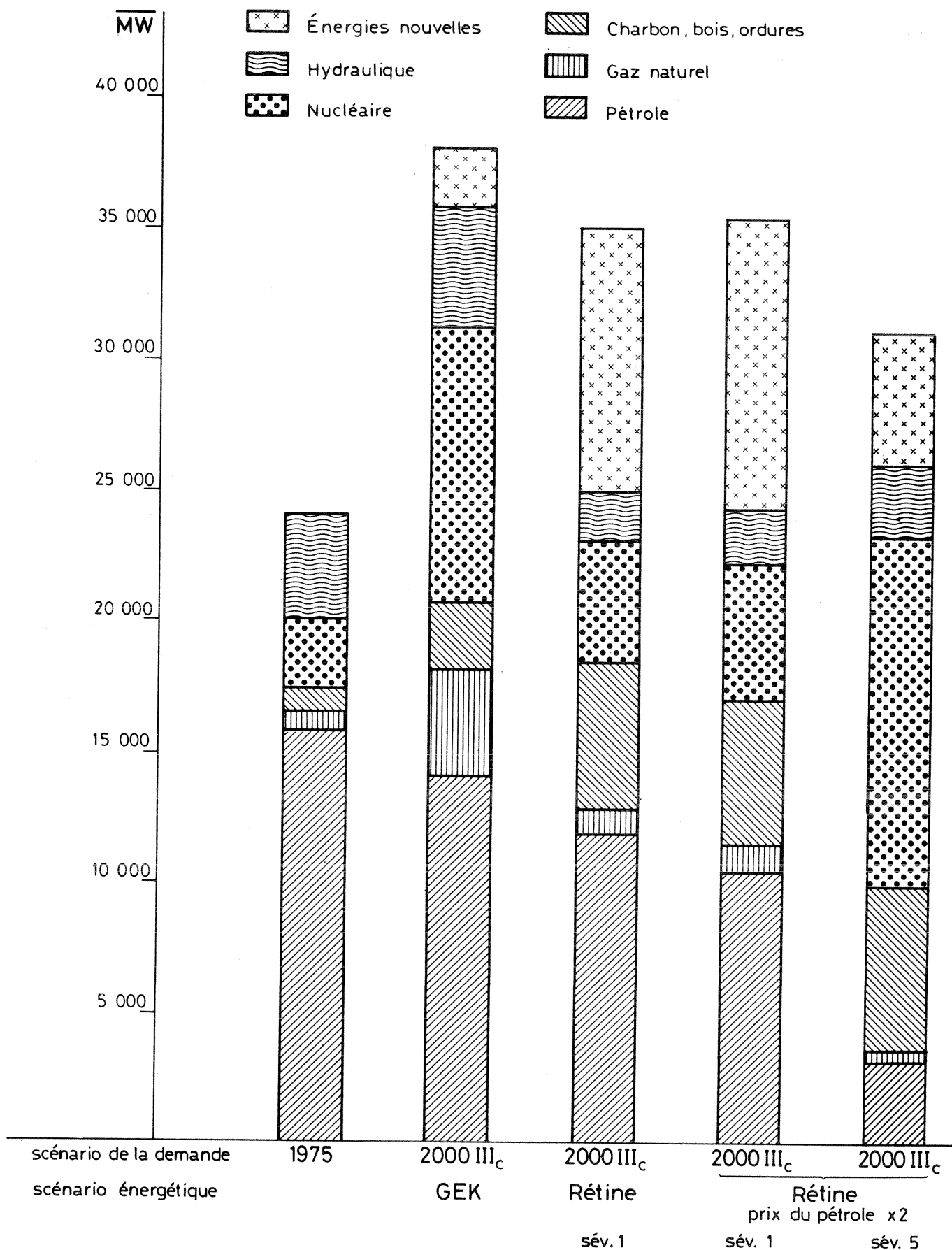


Figure E24 : Exemple d'effet du doublement du prix du pétrole sur l'approvisionnement en énergie primaire*. (Affectation en coût, sévérités 1 et 5; contraintes sur les ordures, le bois, l'hydraulique et le biogaz).

* (voir avertissement au § 5.2 et commentaires au § 5.4.4)

Au vu des résultats obtenus lors de l'affectation en rendement R_2 (figure E17), l'effet de contrainte d'implantation sur certaines technologies d'utilisation a été testé :

. pompes à chaleur	: 150 \overline{MW} d'énergie utile
. technologies solaires pour l'industrie	: 100 \overline{MW} d'énergie utile
. technologies solaires combinées pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire	: 550 \overline{MW} d'énergie utile
. réfrigération, congélation et climatisation à gaz	: 140 \overline{MW} d'énergie utile
. cuisinière à bois	: 100 \overline{MW} d'énergie utile.

La figure E25 présente les différences au niveau des technologies d'utilisation dans les trois cas mentionnés :

- a) aucune contrainte sur le réseau en dehors de celles concernant les centrales hydroélectriques
- b) des contraintes sur certaines ressources (indiquées au § 5.4.1.)
- c) idem que b) et en plus les contraintes citées pour quelques technologies d'utilisation.

La pompe à chaleur, très attractive en l'absence de contraintes, fournit la part principale du chauffage en a) et b). En limitant l'usage, les puissances se distribuent tout différemment : les technologies solaires combinées atteignent leur limite d'implantation et la demande restante en chauffage est assurée par les technologies utilisant un combustible (bois, charbon, mazout, gaz). Les technologies électriques (cuisinières, production de froid, fours industriels et chauffage) ne sont pas attractives par rapport aux technologies utilisant un combustible, le rendement global des chaînes énergétiques étant plus faible. Dans un tel cas, l'introduction de contraintes minimales d'implantation s'avère nécessaire. Cependant, du fait de la limitation de la réfrigération et de la climatisation à gaz, la demande de froid est en grande partie satisfaite par l'électricité dans le cas c). L'effet de la limitation du bois à la valeur des ressources disponibles est visible au niveau des technologies d'utilisation.

Cette redistribution des puissances dans les technologies d'utilisation a des répercussions sur la demande en énergie primaire comme le montre la figure E26.

HYPOTHESES	a (\overline{MW})	b (\overline{MW})	c (\overline{MW})
Lumière + électrochimie	877.00	877.00	877.00
Voiture électrique	133.28	129.28	158.51
Train	533.12	517.12	634.04
Avion	315.04	323.43	285.49
Camion	420.78	424.03	353.25
Voiture essence	311.77	320.14	282.72
Frigo électrique	0.00	0.00	602.00
Frigo gaz	742.00	742.00	140.00
Moteur électrique	1077.47	1069.81	1198.74
Moteur Diesel	664.53	672.19	543.26
Cuisinière électrique	0.00	0.00	0.00
Cuisinière bois	509.44	334.11	100.00
Cuisinière gaz	236.56	411.89	642.00
Four ind. électrique	0.00	0.00	0.00
Chaudière bois	1450.53	376.68	418.50
Chaudière charbon	1174.19	1581.08	1784.29
Chaudière mazout	772.64	1176.65	1423.80
Chaudière gaz	247.78	371.31	347.40
Solaire ind.	428.86	568.28	100.00
Chauffage électrique	0.00	0.00	0.00
Pompe à chaleur	3323.39	3756.40	150.00
Chauffage bois	0.00	0.00	204.59
Chauffage charbon	0.00	0.00	670.95
Chauffage mazout	387.70	499.27	1344.41
Chauffage gaz	0.00	0.00	451.27
Chauffage distance	3097.85	2664.79	3529.05
Chauffage solaire combiné	55.76	55.81	550.00
Eau chaude solaire	738.33	759.34	643.74
Chauffe eau électrique	1096.67	1075.66	1039.42
ENERGIE UTILE TOTALE	18603	18603	18603

Figure E25 : Effets des contraintes sur la répartition des flux dans les technologies d'utilisation (en \overline{MW} utile)

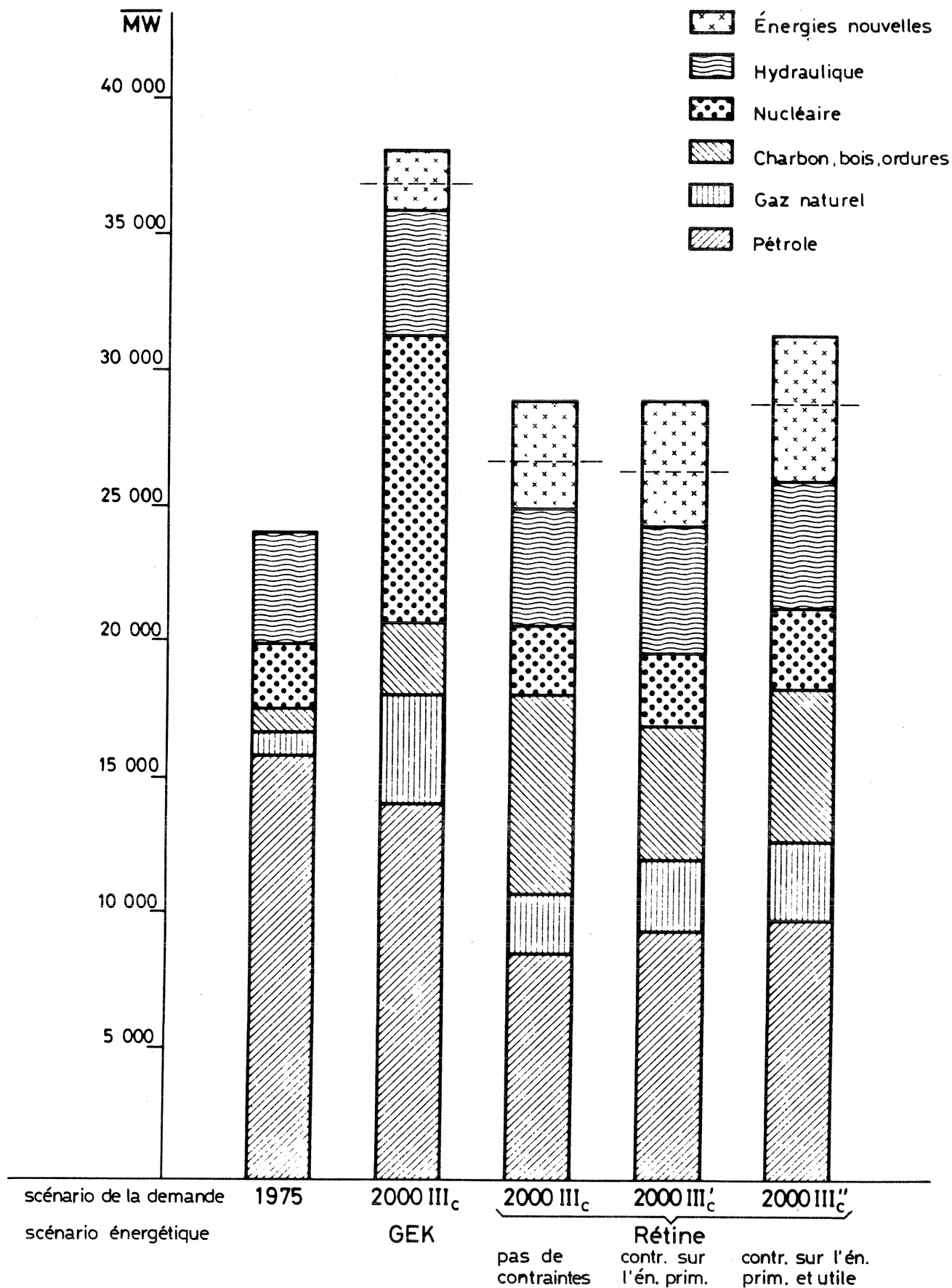


Figure E26 : Exemple d'effet de l'introduction de contraintes sur l'approvisionnement en énergie primaire*. (Affectation en rendement R_2 , sévérité 1).

* (voir avertissement au § 5.2 et commentaires au § 5.4.5)

5.5. Interactions énergie - environnement

5.5.1. Profils de caractéristiques

L'un des buts de la modélisation du système énergétique est d'obtenir des données concernant l'épuisement des ressources non renouvelables et les émissions totales liées à la consommation d'énergie : polluants chimiques, bruit, occupation d'espace, etc. Ces données doivent permettre d'analyser et de comparer les impacts sur l'environnement de différents scénarios énergétiques entre eux ou avec les effets de notre consommation actuelle d'énergie. Cette analyse a fait l'objet des travaux du Volet ENVIRONNEMENT du P.E. ENERGIE (Réf. 29, 34).

Pour tout scénario, le programme RETINE calcule la somme des émissions de particules, de SO_x , de NO_x , etc, cumulées le long des chaînes énergétiques du réseau. Les résultats sont présentés sous la forme de profils de caractéristiques facilitant les comparaisons de scénarios.

Les émissions totales correspondant au scénario de la figure E17 sont montrées à la figure E27a. L'échelle commune de 0 à 10 est à multiplier par le facteur relatif à chaque émission, donné en marge. L'effet de la sévérité, agissant comme une vanne tendant à limiter le passage de l'énergie à travers les technologies de mauvais rendement, apparaît à la figure E27b.

L'acroissement de la consommation de charbon et la diminution du recours au nucléaire ont pour conséquence une augmentation des émissions totales de particules, de SO_x et de CO_2 dans l'air et une diminution des rejets de radionuclides.

Le chauffage à distance étant favorisé au détriment du chauffage individuel à mazout et les transports par chemin de fer, ainsi que par voiture électrique l'étant au détriment des modes de transport utilisant des combustibles liquides, une diminution des émissions totales de CO et d'hydrocarbures devient effective.

5.5.2. Attractivité tenant compte des effets sur l'environnement

Il est évident que le recours massif à des technologies attractives axées sur des combustibles tels que le charbon, le pétrole, le gaz ou l'uranium, contribue à l'épuisement progressif de ressources non renouvelables.

Une limitation de l'épuisement des ressources non renouvelables devrait intervenir.

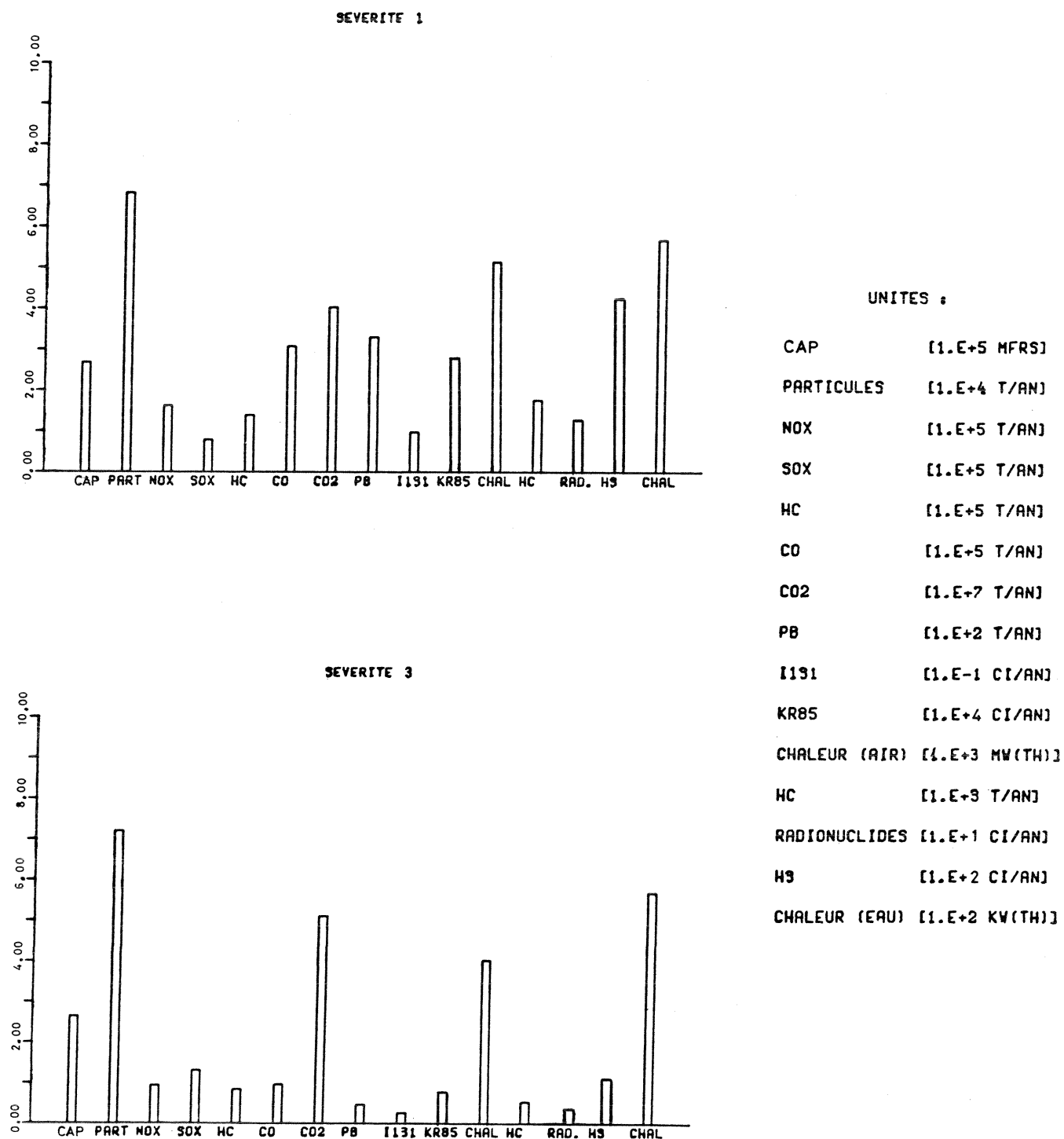


Figure E27 : Profils de caractéristiques (affectation en rendement 2, année 2000, variante IIIc)

Pour tenir compte des interactions existant entre le système énergétique et l'environnement, des scénarios doivent être générés selon des critères tenant compte de l'aspect environnement.

L'indice de durée des ressources ρ , introduit par le Volet ENVIRONNEMENT du P.E. ENERGIE, définit une attractivité des ressources inspirée de l'attractivité en rendement des technologies :

$$\alpha = \rho = \frac{R^*}{1-R^*}$$

$\rho = 1$ pour une ressources renouvelable ou très abondante par rapport à la consommation actuelle.

$\rho = 0$ pour une ressource en voie d'épuisement rapide.

R^* est le "rendement" d'une technologie fictive joignant, sur le réseau énergétique, un point origine (noeud Ressource) à chacune des chaînes énergétiques.

L'indice de durée, calculé sur la base des tendances actuelles de consommation d'énergie et des ressources connues, fournit les valeurs suivantes :

charbon	: $\rho = 1$
pétrole	: $\rho = 0.1$
gaz	: $\rho = 0.3$
uranium	: $\rho = 0.2$ (sans surgénération)
ressources renouvelables	: $\rho = 1$

La figure E28 est une représentation du réseau prolongé jusqu'au noeud Ressource : l'attractivité différenciée des ressources énergétiques, donnée par ρ , produit l'effet souhaité. La comparaison avec le cas de base de la figure E29 montre une importante substitution du pétrole, et dans une moindre mesure du gaz et de l'uranium, par le charbon et les énergies renouvelables (éoliennes, centrales solaires et chauffage solaire combiné).

La comparaison des profils de caractéristiques pour une même sévérité (figures E27 et E29) montre que les émissions totales des différents polluants atmosphériques sont sensiblement réduites. L'analyse multidimensionnelle des effets des diverses émissions sur l'environnement par la méthode AMIEE (Volet ENVIRONNEMENT) concluerait à l'évidence en faveur d'une telle stratégie de substitution, les capitaux à investir jusqu'à l'an 2000 étant cependant supérieurs.

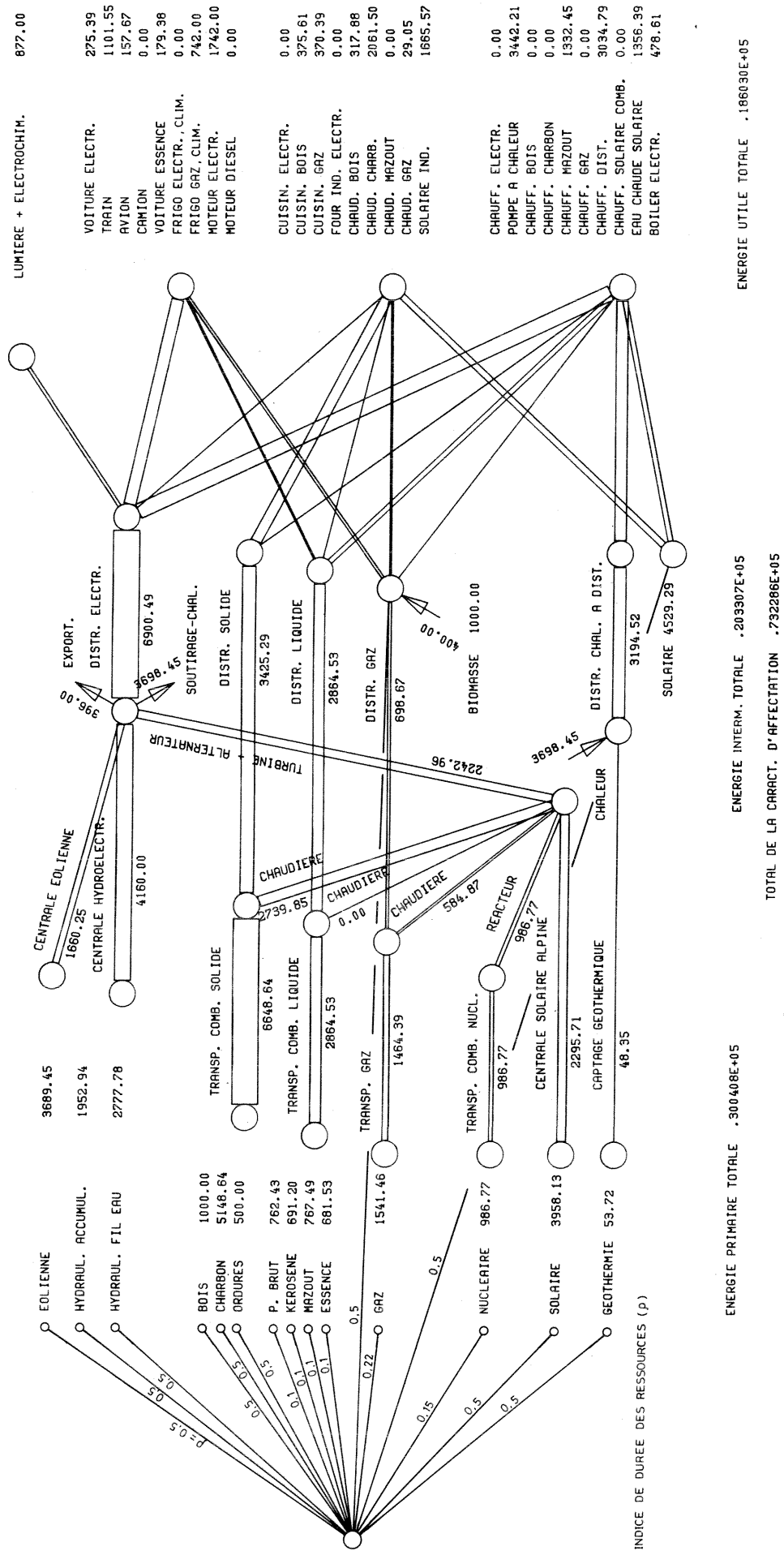


Figure E28 : Extension du réseau aux ressources énergétiques (unités : MW)

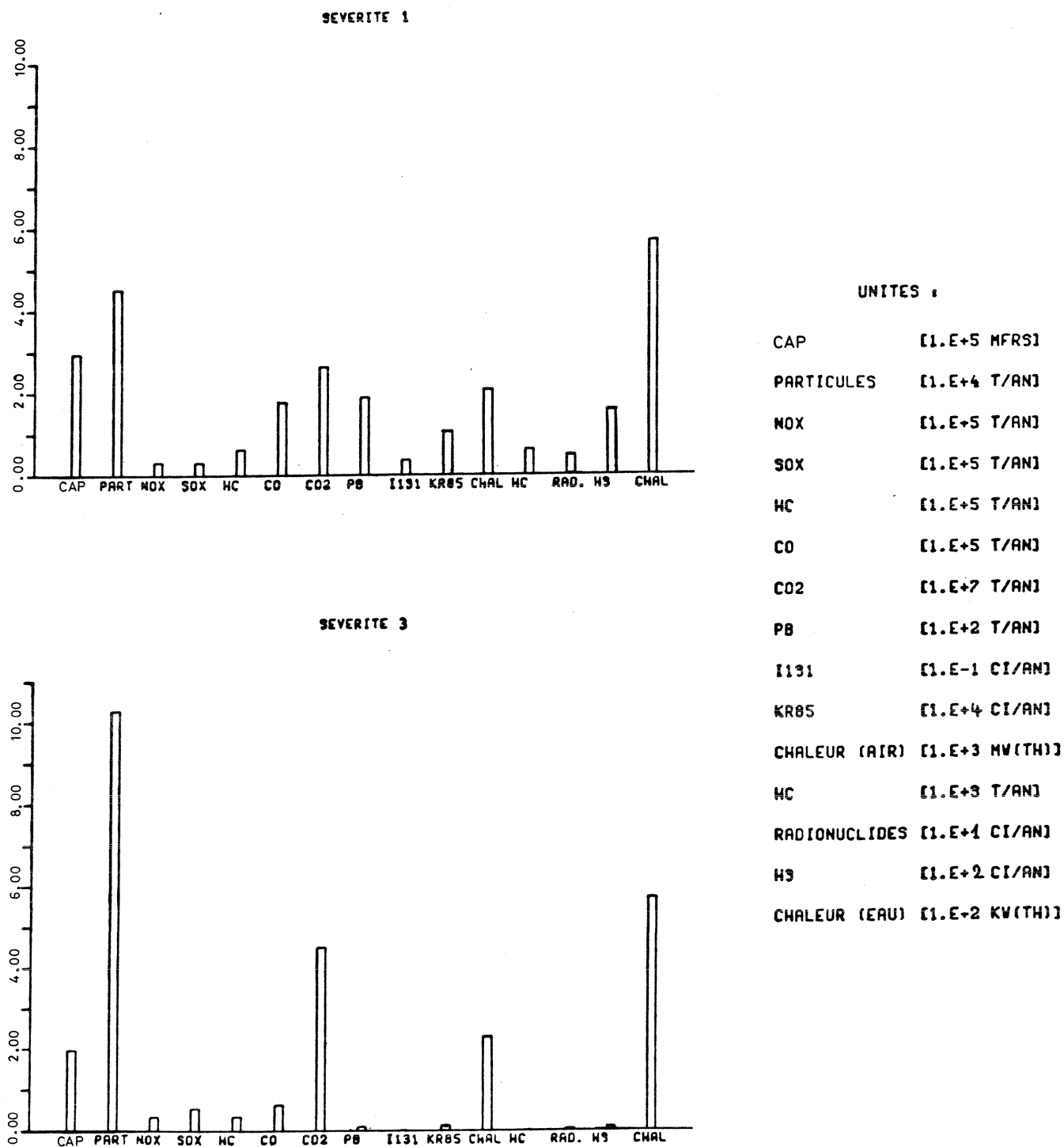


Figure E29 : Profils de caractéristiques (affectation en rendement 2, tenant compte des effets sur l'environnement, année 2000, variante IIIc)

On peut également envisager des critères tenant compte des autres effets, en particulier des émissions dans l'environnement. Par exemple, il serait possible de pondérer l'attractivité en coût des technologies par un facteur qualitatif tenant compte des effets sur l'environnement de chaque technologie :

$$\alpha = \frac{1}{C (1 + S \cdot g)} \quad \text{avec}$$

g = index de gravité tenant compte des effets sur l'environnement

(voir § 2.2 p.56)

S = facteur de pondération

$C \cdot S \cdot g$ représente un coût social spécifique.

Nous n'avons fait qu'esquisser ici comment l'on pouvait prendre en compte, dans la génération de scénarios énergétiques, les effets possibles de la consommation d'énergie sur les ressources et l'environnement. Des développements de la méthodologie d'interaction restent souhaitables.

7. RAPPORTS ANNEXES ET PUBLICATIONS

- [1] B. SAUGY, Y. BOVET, A. ROULIER : Modélisation du système énergétique suisse. Proceedings of the International Symposium "Simulation 77". Actapress Zurich, Montreux, 1977.
- [2] B. SAUGY, Y. BOVET, A. ROULIER : Energy Strategies : a technical assessment. Proceedings of the Workshop on Energy Strategies : Conception and Embedding. IIASA, Laxenburg, 1977.
- [3] Y. BOVET, P. DIND, A. ROULIER + collaborateurs occasionnels : Banque de données CARTEN. Caractéristiques des technologies énergétiques. EPF-L - Institut de Production d'Energie. Lausanne, 1979.
- [4] P. DIND : Annexe à CARTEN : calcul du rendement exergétique des technologies. EPF-L - Institut de Production d'Energie
- [5] A. ROULIER : Programme RETINE. Manuel de l'utilisateur. EPF-L - Institut de Production d'Energie
- [6] J.-M. TOINET : Energie et économie : la formation de capital physique. Thèse de doctorat en préparation. EPF-L.
- [7] B. SAUGY : Evaluation de stratégies énergétiques dans le contexte économique. Ingénieurs et architectes suisses, 2/79, 14 - 19.
- [8] J.-M. TOINET : A comparison of energy costs in a number of European countries. Rapport IPEN - EPF-L, 1979.
- [9] J.-M. TOINET : Grey energy : The generation of consumption in an Input - Output approach. Proceedings of the 6th Global Modeling Conference. IIASA, Laxenburg, 1978.

8. REFERENCES

- [10] K.C. HOFFMAN & D.A. WOOD : Energy System Modelling and Forecasting. In : Annual Review of Energy. Annual reviews, Palo Alto, 1977.
- [11] F. ALTDORFER, M. FINNIS, S. RATH-NAGEL : An International Programm for Evaluating Energy Technologies and Strategies Athènes, 1978.
- [12] Commission fédérale de la conception globale de l'énergie. Rapport final. Berne, 1978.

- [13] Premier séminaire sur la modélisation énergétique (1978). EPF-L - Institut de production d'énergie. Publication EPF-L N° 180. 1979.
- [14] Centre Interfacultaire de calcul électronique. INFOL-2. Manuel de référence. Genève, 1973.
- [15] L. BOREL : Economie énergétique et exergie. EPF-L - Institut de Thermodynamique. Lausanne, 1974.
- [16] M.-A. ERBETTA : Le bruit des sources mobiles en Suisse. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1979.
- [17] A. GARDEL : Energie, économie et prospective. Pergamon Press, Londres, 1979.
- [18] R.A. HERENDEEN : The use of Input-Output analysis to determine the energy cost of goods and services. In : M.S. MACRAKIS, Energy : demand, conservation and institutional problems. MIT, Cambridge, 1974.
- [19] R. STONE, J.A.C. BROWN : A long Term Growth Model for the British Economy. In : R.C. Geary, Europe's Future in Figures. North Holland, Amsterdam, 1962.
- [20] G. ANTILLE, E. BARANZINI, J. BURLE de FIGUEIREDO : Expériences en vue de la construction d'un tableau Input-Output pour la Suisse. Projet Suisse. Rapport présenté à l'Assemblée annuelle de la Société suisse de statistique et d'économie politique. Neuchâtel, 1971.
- [21] Bureau fédéral de statistique : Séries révisées de la comptabilité nationale suisse, 1948-1976. Berne, 1977.
- [22] Direction générale des douanes : Statistique annuelle du commerce extérieur de la Suisse, 1970. Berne, 1971.
- [23] Office statistique des Communautés européennes : Tableaux Entrées-Sorties 1970. Vol. 1 à 9. Luxembourg, 1976.
- [24] Office fédéral de l'économie énergétique : Apports et consommation d'énergie en Suisse de 1970 à 1975. Bulletin ASE-UCS-23, 1976, pp 1262 à 1284.
- [25] Eidg. Kommission für die Gesamtenergie Konzeption : die Kosten der Energieversorgung in der Schweiz. Ausgearbeitet durch Motor Columbus AG. Baden. Studie Nr. 2. Bern, 1976.

- [26] Eidg. Kommission für die Gesamtenergiekonzeption : Stabilisierungsvarianten. Ausgearbeitet durch Arbeits gruppe EWU, Zürich. Studie Nr. 11 a. Bern, 1977.
- [27] CECH: Au-delà de la contrainte des faits. Une contribution des organisations écologiques à la conception globale de l'énergie suisse. Zürich, 1978.
- [28] Commission pour une conception globale de l'énergie : Etendue et signification des forces hydrauliques suisses non encore utilisées. Publication N° 13. Bern, 1977.
- [29] P. DIND : Epuisement et renouvellement des ressources énergétiques. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1979.
- [30] Commission pour une conception globale de l'énergie : Le potentiel énergétique suisse du gaz de fumier. Etude faite par SEDE SA, Vevey. Publication N° 17. Berne, 1977.
- [31] L. BOREL : Théorie générale de l'exergie et applications pratiques. Revue ENTROPIE. NOS 85, 86 et 87. Ed. Barthelemy & Cie. 75 008 Paris, 1979.
- [32] R. MORISOD et L. BOREL : Application de la comptabilité exergétique au problème du chauffage à distance en Suisse. Publications de la Commission fédérale de la conception globale de l'énergie. Etude N° 3. Berne, 1976.
- [33] L. BOREL et G. YANNI : Aspect thermodynamique du remplacement du chauffage individuel par d'autres modes de chauffage. EPF-L - Institut de Thermodynamique. Lausanne, 1977.
- [34] P. DIND : Energie et accidents. Evaluation des impacts sur l'homme et l'environnement des accidents liés à l'exploitation des différentes sources d'énergie. EPF-L - Institut de Thermodynamique et Institut du Génie de l'Environnement. Lausanne, 1979.

F. CONCLUSIONS

Le P.E. ENERGIE a donné lieu à des travaux nombreux qui ont conduit aux conclusions suivantes :

● Volet CONSOMMATION

La plupart des énergies primaires consommées actuellement ne sont pas renouvelables à l'échelle humaine. Il n'est pas raisonnable de puiser dans ces réserves sans discernement. Les générations futures et les autres pays ont autant droit à ces richesses que la génération actuelle. Il convient donc d'utiliser l'énergie avec modération et surtout de porter une attention toute particulière aux maillons des chaînes énergétiques qui sont générateurs de pertes importantes. La notion d'exergie et la comptabilité exergétique nous permettent de définir des valeurs de référence et de quantifier les pertes des systèmes choisis. Il est important de restreindre toute demande dans la mesure du possible et de réduire au minimum les pertes exergétiques.

Ce volet donne l'approche d'une nouvelle méthode d'évaluation et d'analyse de la consommation d'énergie. En partant des valeurs données par les statistiques au niveau de la vente aux derniers consommateurs, on recherche la valeur théorique minimale correspondant à l'utilisation finale. On définit de cette façon la fourchette dans laquelle des améliorations peuvent se produire et il devient plus facile de reconnaître les secteurs d'utilisation où un effort doit être porté. Le fait de disposer d'une valeur de référence, rend plus facile l'évaluation de l'importance du succès ou de l'échec des mesures prises en vue de réduire la consommation d'énergie.

Il est souhaitable que des études semblables soient faites à tous les stades des chaînes énergétiques. Au même titre que pour la plupart des industries actuellement, l'énergie deviendra pour l'ensemble des consommateurs un élément de coût déterminant qu'il s'agira d'analyser et de contrôler très sérieusement et en permanence. L'avenir réserve à l'énergie un rôle important, pour lequel il est encore temps de se préparer.

● Volet ENVIRONNEMENT

Un effort important a été consacré à l'étude des facteurs d'atteinte à l'environnement, à l'estimation des niveaux de leurs émissions et à la

description des effets de ces émissions. De nombreuses "études d'effets" ont été préparées. Des relations ont été ensuite établies entre les niveaux d'émission et la gravité des effets résultants, ceci pour certaines gammes de niveaux d'émission. Le terme émission est ici entendu dans un sens très large qui s'étend par exemple aux impacts visuels et fonctionnels des constructions servant à la production et au transport de l'énergie.

Les travaux ont montré qu'il n'était pas possible d'élaborer une méthode permettant d'optimiser automatiquement des scénarios énergétiques et de déterminer de manière univoque et irréfutable le meilleur compromis entre technique, économie, sauvegarde des ressources et protection de l'homme et de l'environnement.

Face à la multiplicité des effets sur l'environnement, il a été développé une méthode d'analyse multidimensionnelle appelée AMIEE (Analyse Multidimensionnelle de l'Interaction Energie-Environnement). La méthode AMIEE et le calibrage de ses instruments d'analyse est basée sur la connaissance des causes et effets sur l'environnement de scénarios énergétiques. Elle exprime ces effets sous la forme d'un nombre restreint de descripteurs numériques d'effets.

La méthode AMIEE est susceptible de réaliser la prise en considération des impacts sur l'environnement dans l'évaluation des stratégies énergétiques. La démarche poursuivie s'intègre aux travaux des autres volets du P.E. ENERGIE. En particulier, le Volet ENVIRONNEMENT reçoit des autres volets les données caractéristiques d'émission et de consommation des stratégies énergétiques soumises à l'étude. De même, les résultats de l'analyse des effets sur l'environnement obtenus par le Volet ENVIRONNEMENT sont transmis aux autres volets pour être utilisés dans la création, la modification et la comparaison des stratégies.

Le Volet ENVIRONNEMENT a également conduit d'autres études de support de son objectif, comme par exemple celle des normes de protection de l'environnement et des coûts de diminution de la pollution.

Il conviendrait maintenant de disposer de moyens permettant de tirer parti du travail accompli, en poursuivant le développement de la méthode AMIEE et en l'appliquant de façon systématique. Son domaine d'application couvre, comme prévu initialement, l'ensemble des systèmes énergétiques intéressant les responsables de l'économie énergétique en Suisse. Il pourrait également englober toute activité humaine entraînant des effets sur l'environnement.

● Volet ENERGIE SOLAIRE

Les recherches sectorielles ont conduit aux résultats suivants :

- . développement de plusieurs nouveaux types d'éléments de façade - capteur (détermination du gain solaire de fenêtres)
- . étude d'installations solaires actives pour la préparation d'eau chaude sanitaire (importance des aspects "transitoire" et "régulation")
- . étude théorique et expérimentation du captage direct du rayonnement solaire à l'aide de suspensions de particules de graphite dans de l'azote (perspectives d'application bonnes pour la thermochimie solaire, mais mauvaises pour des machines thermiques solaires)
- . mesures détaillées et de longue durée d'une installation solaire (chauffage et eau chaude) combinée avec pompe à chaleur (détermination du gain annuel des capteurs plans et à concentration et mise en évidence de l'importance de la conception du stockage)
- . réalisation d'un nouveau type de stockage utilisant la chaleur de fusion de sels organiques, avec amélioration du transfert - chaleur par fonctionnement "agité" (prix de stockage inférieur à celui d'un accumulateur à eau, si le nombre annuel de cycles est suffisamment élevé).

Les connaissances et compétences acquises ont permis de chiffrer les données concernant l'énergie solaire (dont le Volet MODELISATION a besoin) en ce qui concerne la contribution possible de l'énergie solaire en Suisse, ceci dans les perspectives élaborées par la GEK et la KNS.

A moyen terme (20 ans), l'énergie solaire utilisée de façon directe peut contribuer, d'une manière non négligeable (5-10%), à remplacer et surtout à compléter d'autres formes d'énergie. Ce seront surtout les systèmes passifs, la chaleur industrielle et la préparation d'eau chaude qui peuvent être intéressants.

Le calcul de l'énergie investie dans les installations solaires (fabrication du verre, nourriture des ouvriers, etc) montre qu'elle est récupérée dans 2 à 5 ans de service.

A long terme (100 ans), l'énergie solaire directe et indirecte pourrait contribuer à l'approvisionnement énergétique dans une plus large mesure encore (hydraulique et bois compris, jusqu'à 40%). Une autre fraction importante pourrait être couverte par des vecteurs d'énergie synthétiques importés, produits par l'énergie solaire dans des pays plus chauds.

En ce qui concerne les travaux de recherche et de développement dans un futur programme suisse, nos recommandations sont les suivantes :

- Chauffage des bâtiments et eau chaude

- . Systèmes passifs : leur contribution peut être très significative. Les problèmes majeurs sont l'intégration architecturale, l'exécution d'essais avec des maisons pilotes en tenant compte des habitudes des habitants et l'information des milieux concernés (nécessité d'un effort au sein des écoles d'architecture)
- . Systèmes actifs : les problèmes majeurs concernent la performance dynamique des systèmes, la durée de vie et l'intégration avec d'autres mesures (isolation) et sources d'énergie (pompes à chaleur). Ce travail est partiellement du ressort des EPF et partiellement de celui des ETS. De plus, le stockage à moyen et à long termes constitue une "motivation" pour une collaboration interdisciplinaire (Génie civil, géologues, chimistes).

- Autres domaines

- . Chaleur industrielle : développement de composantes et adaptations des procédés industriels aux particularités solaires (EPF, industrie)
- . Photovoltaïsme : poursuite des idées originales promettant des cellules bon marché et efficaces. Etude de l'adaptation du système électrique annexe et de l'interaction avec le réseau. Conception et économie d'installations de taille moyenne (0,5 - 2 MW) (EPF, universités, EIR, industrie)
- . Thermochimie : recherche et développement de procédés, sur la base des résultats déjà obtenus (Process Heat). Effort interdisciplinaire (EPF, Chimie, Mécanique, et industrie)
- . Photochimie : recherche de base (EPF, universités)
- . Centrales thermiques : développement de composantes et optimisation du système (plutôt industrie, EPF comme soustraction)
- . Biomasse, bois : des problèmes technologiques importants se posent pour l'utilisation à grande échelle. De nouvelles solutions peuvent s'avérer pertinentes. Le travail est pluridisciplinaire (EPF, ETS, agriculteurs, forestiers, stations agronomiques fédérales, industrie).

- Volet MODELISATION

Une banque de caractéristiques des technologies énergétiques (CARTEN) similaire à la banque américaine EMDB a été établie. Cette banque est adaptée aux conditions suisses et aux spécifications des modèles proposés.

Un programme de calcul, RETINE, permet de générer un réseau des technologies énergétiques à l'aide de la banque CARTEN, il procède à la répartition des flux d'énergie entre les diverses technologies, pour une attractivité donnée et plusieurs degrés de sévérité. Le calcul des caractéristiques globales de la stratégie (par ex. total des investissements ou des émissions de CO₂) est effectué et constitue le profil de la stratégie.

Les résultats principaux des études sur les technologies solaires sont introduites dans la banque CARTEN. Des passages de RETINE permettent alors de déterminer le potentiel global d'une nouvelle technologie selon que l'accent est mis sur les coûts, les performances techniques ou le caractère renouvelable des ressources. La génération des stratégies types fournit les bases de l'analyse multicritère effectuée par le Volet ENVIRONNEMENT. Les stratégies générées peuvent être simplement décrites avec leurs avantages et inconvénients, les plus significatives d'entre elles peuvent être retenues comme options possibles de scénarios énergétiques. L'analyse multicritère des impacts sur l'environnement peut conduire à modifier l'attractivité des technologies et réduire par itérations successives les impacts sur l'environnement les plus importants.

Les exemples d'application présentés indiquent clairement les vastes possibilités offertes par les outils développés au sein du Volet MODELISATION. La banque de données CARTEN et le programme RETINE peuvent être utilisés de manière complémentaire pour l'étude technique de systèmes énergétiques et pour l'élaboration de stratégies énergétiques. Les impacts sur l'économie peuvent être évalués dans un premier stade grâce au concept de contenu énergétique des biens et services qui représente une importante liaison entre les systèmes énergétique et économique.

Ces outils aident à mieux comprendre les phénomènes énergétiques et économiques tels qu'ils sont dans la réalité et donnent aussi les moyens nécessaires à l'étude des mécanismes régissant la consommation d'énergie. Finalement, c'est bien celle-ci qu'il importe d'étudier, non seulement pour surmonter les difficultés actuelles, mais encore pour fournir un développement harmonieux du système énergétique comme du système économique. Il faut en effet être conscient que l'un ne peut être fait sans l'autre et qu'à ce titre les interactions énergie-économie sont certainement beaucoup plus fortes qu'on ne l'admet généralement. Dans cette optique, une description technique du système énergétique a son importance, parce qu'elle permet d'apporter les notions de pertes et de qualité de l'énergie à ces interactions.

Si la croissance de la consommation d'énergie primaire suit la croissance économique, il faut néanmoins vérifier ce qu'il en est au niveau de l'énergie utile. La complémentarité des outils développés dans cette étude donne la possibilité d'effectuer une telle approche et d'y apporter quelques commentaires. Des enseignements utiles pour l'avenir et pour la prévision de la consommation d'énergie pourraient en être tirés. C'est donc la combinaison de tous ces éléments qu'il s'agit de promouvoir.

Remarque finale

Pour terminer, nous exprimons le souhait que l'outil de travail forgé au sein du P.E. ENERGIE de l'EPF-L soit utilisé par les responsables de l'énergie en Suisse, en vue d'une évolution de notre système énergétique vers une technologie au service de l'homme, c'est-à-dire soucieuse d'économiser l'énergie, de mettre en oeuvre les énergies renouvelables et de respecter l'environnement.